ENCYCLOPÉDIE INDUSTRIELLE

VERRE ET VERRERIE

*Tous les exemplaires de VERRE ET VERRERIE devront être revêtus de la Signature du Directeur de l'*Encyclopédie Industrielle *et de la griffe des Libraires.*

ENCYCLOPÉDIE INDUSTRIELLE

Fondée par M.-C. Lechalas, Inspecteur général des Ponts et Chaussées en retraite

VERRE ET VERRERIE

PAR

Léon APPERT et Jules HENRIVAUX

INGÉNIEURS

HISTORIQUE. — CLASSIFICATION
COMPOSITION. — ACTION DES AGENTS PHYSIQUES ET CHIMIQUES
PRODUITS RÉFRACTAIRES. — FOURS DE VERRERIE
COMBUSTIBLES. — VERRES ORDINAIRES. — GLACES ET PRODUITS SPÉCIAUX
VERRES DE BOHÊME. — CRISTAL. — VERRES D'OPTIQUE. — PHARES
STRASS. — ÉMAIL. — VERRES COLORÉS
MOSAIQUE. — VITRAUX. — VERRES DURS. — VERRES MALLÉABLES
VERRES DURCIS PAR LA TREMPE
ÉTUDE THÉORIQUE ET PRATIQUE DES DÉFAUTS DU VERRE

PARIS

GAUTHIER-VILLARS ET FILS, IMPRIMEURS-LIBRAIRES

DE L'ÉCOLE POLYTECHNIQUE, DU BUREAU DES LONGITUDES, ETC.

Quai des Grands-Augustins, 55

1894

ERRATA

Pages	Lignes	Au lieu de	Lire
23	dernière	la sesquioxyde	le sesquioxyde
70	30e	transport gédogique	transport géologique
101	19e	La raison	En raison
106	3e	tirage de la chaudière	tirage de la cheminée
129	10e	bue le gaz initial	que le gaz initial
131	3e du bas	refroidis vers 3,000	refroidis vers 300°
136	13e	isolément du four	isolément au four
		acide carbonique	hydrogène
146	tableau	hydrogène	carbure d'hydrogène
		carbure d'hydrogène	acide carbonique
271	6e	marquer la teinte	masquer la teinte
275	17e	$SiO^3NaO + CO + S$	$SiO^3NaO + 3CO + S$
332	5e	figure 6	figure 110
365	16e	plan-convexe I	plan-convexe L
386	4e	Safré	Safre

INTRODUCTION

§ 1. — Origine du verre. — Historique

La question de l'origine du verre est une de celles qui ont été le plus discutées.

Des peintures trouvées dans les sarcophages des plus anciennes dynasties des rois égyptiens ont permis à Sir William Gardmer Wilkinson d'établir de façon irréfutable que la fabrication du verre existait en Égypte plus de deux mille ans avant l'ère chrétienne.

Il est absolument hors de doute, que les Romains connaissaient le verre quelques siècles avant notre ère, cependant l'usage ne s'en répandit en Italie qu'après la conquête de l'Égypte par Jules César, qui imposa à la nouvelle province romaine l'obligation de payer son tribut en objets de verrerie. Peu après, Néron fit venir d'Égypte des ouvriers qui fondèrent à Rome la première verrerie.

L'industrie du verre devint rapidement florissante en Italie et les nombreux spécimens de cette fabrication, qui ont été conservés jusqu'aujourd'hui, attestent le degré de perfection auquel les Romains surent l'amener.

La fabrication s'étendit aux objets de toute espèce, car on retrouve chaque jour dans les tombeaux romains et gallo-romains des colliers de verroterie, dont les Gaulois aimaient à se parer, des objets affectés à la toilette ou aux usages domestiques, des urnes funéraires. Ces dernières sont généralement remarquables par la beauté et l'élégance de leurs formes, en même temps que par le fini de l'exécution.

Nous citerons, comme ayant un cachet réellement artistique, le célèbre vase Barberini (*fig.* 1) et un vase en forme d'amphore qui fait l'ornement du musée de Naples (*fig.* 2).

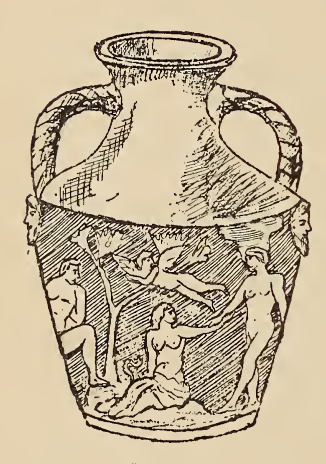


Fig. 1.



Fig. 2.

Les fouilles entreprises dans les ruines de Pompéi ont établi, de la façon la plus certaine, que les vitres étaient connues des Romains au commencement de notre ère; leur emploi n'était encore que très restreint, car on n'en a retrouvé des traces que dans les habitations des familles patriciennes.

Le verre fabriqué par les Romains avait une composition toute différente de celle que les verreries livrent actuellement au commerce, ainsi que l'on pourra s'en rendre compte par les analyses ci-dessous :

	Verre retrouvé à Pompéi	Verre à vitres actuel
Silice	69,43	69,6
Chaux	7,34	13,4
Soude	17,21	15,2
Alumine	2,55	1.8
Oxyde de fer	1,15	»
Manganèse	0,39	»
Oxyde de cuivre	traces	»
	98,07	100,00

Ce verre, qui était beaucoup plus riche en alcalis que le verre moderne, était aussi, par suite, beaucoup plus fusible, condition presque nécessaire à une époque où les moyens de fusion étaient peu puissants.

On remarquera également dans le verre antique la présence du manganèse, ce qui démontre surabondamment que les propriétés décolorantes de ce corps n'avaient pas échappé à la sagacité des verriers romains.

Il était intéressant de rechercher par quel mode de fabrication ce verre avait été obtenu.

En examinant la forme et la disposition des bulles, Bontemps a reconnu que les vitres de Pompéi avaient été fabriquées par moulage. Ces bulles ne présentent pas, en effet, la forme allongée, à directions parallèles ou en rayons, que l'on constaterait si les vitres avaient été fabriquées par l'un des deux procédés actuels — procédé des cylindres ou procédé des plateaux ; — comme, d'autre part, l'épaisseur des feuilles est plus considérable sur les

bords qu'au centre, il est hors de doute que ces vitres ont été moulées.

Après la conquête des Gaules, les Romains établirent dans ce pays des verreries qui devinrent rapidement prospères, à en juger par un spécimen (*fig.* 3) trouvé, en 1825, aux portes de Strasbourg. L'examen de ce vase dénote un travail artistique très remarquable.

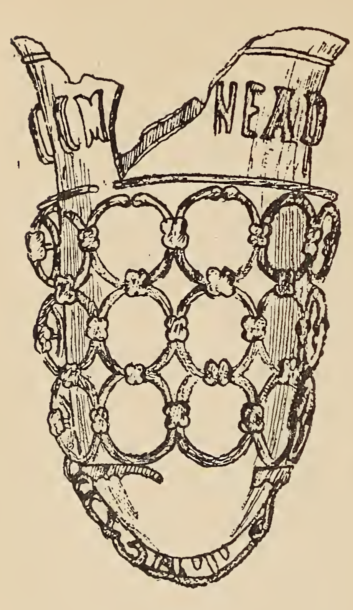


Fig. 3.

C'est vers le VIe siècle qu'on paraît avoir, en Gaule, pensé à utiliser le verre pour la décoration des fenêtres des édifices religieux, sous la forme de vitraux, sortes de mosaïques translucides formées de morceaux de verre diversement colorés, juxtaposés et réunis entre eux.

Après le démembrement de l'empire romain, l'empereur Constantin appela à Byzance des verriers qu'il combla de faveurs et de privilèges ; aussi la verrerie byzantine arriva-t-elle rapidement à produire de véritables œuvres d'art, parmi lesquelles les plus réputées sont des vases colorés, rehaussés d'applications d'or, de peintures en émaux de couleur et d'ornements en filigranes de verre.

A la prise de Constantinople, les Vénitiens appelèrent les verriers byzantins. En raison de la prodigieuse activité des Vénitiens et des débouchés nombreux que leur commerce étendu leur avait créés, la verrerie devint très

florissante, et les produits de Venise acquirent rapidement, dans le monde entier, une réputation justement méritée.

Jaloux de conserver une supériorité que cherchaient à enlever à l'industrie vénitienne les nations voisines, ses tributaires, et désireux tout à la fois de ne pas laisser échapper une source aussi féconde de revenus, le Conseil des Dix édicta les lois les plus rigoureuses.

C'est ainsi qu'après avoir relégué cette industrie dans l'île de Murano il décréta que, sous aucun prétexte, les verriers ne pourraient quitter l'île, et que la peine de mort serait prononcée contre tout artisan reconnu coupable d'avoir divulgué les secrets de la fabrication. L'impunité n'était même pas assurée au délinquant par sa fuite à l'étranger ; les émissaires du farouche Conseil des Dix savaient l'y retrouver et exécutaient la terrible sentence.

L'application de ces mesures sévères assura à Venise, pendant plusieurs siècles, la suprématie dans la fabrication du verre.

Au XVIe siècle, des verreries s'établirent en Angleterre, en Allemagne et en France, et s'appliquèrent spécialement à la fabrication d'objets de gobeleterie.

En Bohême, où la gravure et la taille du verre prirent naissance, l'industrie du verre fit des progrès très rapides ; dès le XVIIe siècle, la pureté incomparable de la pâte et la forme des produits leur donnaient une supériorité incontestée sur les produits similaires des verriers vénitiens.

Au XVIIe siècle, ces derniers n'étaient restés les maîtres que pour la fabrication des glaces.

A cette époque, Colbert chargea François de Bouzy, ambassadeur de France à Venise, de la difficile mission

de dérober le secret qu'elle possédait depuis plusieurs siècles. Bouzy réussit, par de brillantes promesses, à décider quatre ouvriers vénitiens à partir pour la France. Il se forma aussitôt une société à laquelle Colbert donna des privilèges exorbitants : ainsi, elle avait droit d'expropriation dans tout le royaume. La première fabrique fut établie rue Saint-Antoine (Paris), avec Nicolas Desnoyers pour directeur.

Les débuts furent difficiles, par suite de la mauvaise volonté et des craintes exagérées que manifestaient les ouvriers vénitiens. Ils ne voulaient travailler que seuls et en cachette ; quand l'un d'eux était malade, l'usine chômait.

L'œuvre commencée par Colbert menaçait de péricliter, quand Lucas de Nehou parvint à surprendre le secret des Vénitiens. Il fonda alors une société à Paris et alla, en 1695, s'installer au château de Saint-Gobain.

Comme le montre cet exposé sommaire, l'industrie du verre, malgré son développement à travers les âges, ne reposait que sur d'anciens procédés et ne vivait que de recettes mystérieusement transmises.

Depuis quelques années, elle entre dans une voie nouvelle et semble devoir suivre, comme perfectionnement de fabrication et comme applications, le mouvement que les besoins plus pressants et constamment renouvelés de la civilisation impriment à l'industrie moderne.

Des procédés nouveaux de fusion plus puissants et plus économiques, basés sur l'étude des phénomènes de la combustion ; l'emploi de moyens mécaniques destinés à suppléer, à remplacer même le travail toujours épuisant et limité de l'homme, l'utilisation judicieuse des richesses naturelles ont permis de trouver au verre des applications

nouvelles où ses nombreuses et incomparables qualités ont pu être utilisées.

En dehors de son emploi pour les usages domestiques, le verre est appelé à répondre aux besoins de l'hygiène sous les formes les plus diverses.

Mais aussi quelle matière incomparable est le verre ! Dans quelle substance ouvrable peut-on voir réunies un aussi grand nombre de qualités précieuses? Sa transparence et sa limpidité en ont fait un agent d'investigation indispensable dans les recherches astronomiques et pour la construction des appareils d'optique les plus puissants, en même temps qu'un agent d'assainissement des plus actifs; par son inaltérabilité et le poli de sa surface, il est au nombre des corps les plus précieux contre les contagions morbides; aussi son emploi dans la construction des habitations a-t-il pris une importance croissante, que ses qualités décoratives contribueront à développer.

Sous les mains habiles de nos souffleurs verriers, le verre prend les formes les plus variées ; il se transforme en ces nombreux appareils d'observation auxquels la science est en grande partie redevable des progrès inouïs qu'elle a accomplis dans ces derniers temps.

Le verre est devenu pour elle l'outil par excellence, grâce auquel elle peut arracher, un à un, à la nature ses secrets les plus cachés. L'électricité tire parti, dans l'emploi du verre à la fabrication des isolateurs et des récipients ou vases d'accumulateurs, de sa non-conductibilité pour le fluide électrique, de même qu'elle utilise ses propriétés, non moins précieuses, de transparence et de réfringence dans les puissantes lentilles des phares modernes et les modestes enveloppes des lampes à incandescence.

En un mot, il n'est pas d'industrie qui ne soit tribu-

taire de l'industrie du verre et qui ne lui doive une bonne part des progrès qu'elle a pu accomplir.

§ 2. — **Définition. — Propriétés fondamentales**

On donne le nom de verre à une substance fusible à haute température, cassante, dure, transparente ou opaque, insoluble dans l'eau, pouvant résister à l'action des acides même concentrés, formée par la combinaison en proportions variables d'un silicate de soude ou de potasse avec un ou plusieurs des silicates suivants : silicate de chaux, de magnésie, de baryte, d'alumine, de fer, de zinc ou de plomb. Dans ce dernier cas, le verre porte la désignation de cristal.

Selon la nature et la proportion des bases qui entrent dans la constitution du verre, les propriétés de ce dernier sont modifiées. C'est ainsi que, d'une façon générale, la stabilité, la dureté sont augmentées par un excès de chaux, de magnésie et d'alumine, tandis que ces propriétés sont atténuées par un excès de plomb, de bismuth, de zinc ou de fer.

Par contre, ces bases, et surtout le plomb, donnent au verre une fusibilité très grande et lui communiquent un éclat et un pouvoir réfringent considérables, précieux dans les applications à l'optique.

En ce qui concerne la coloration, le choix des bases a une importance capitale : la soude donne un verre qui, bien que très peu teinté en bleu verdâtre, est moins incolore que celui qu'on obtient avec la potasse ; le fer et le manganèse colorent fortement le verre, il en est de même de certains oxydes métalliques, ceux de cobalt, de nickel,

de cuivre, d'urane, d'argent, d'or, qui donnent au verre une coloration, propre à chacun d'eux, dont on tire parti dans la fabrication des verres colorés.

D'une manière générale, on a constaté que le verre gagnait en fixité si, au lieu d'un seul silicate, il s'en trouve plusieurs en mélange ; le verre qui en résulte est plus stable, plus fusible, moins sujet à se dévitrifier.

C'est là une condition heureuse dont bénéficie la fabrication des verres communs et sur laquelle nous aurons l'occasion de revenir en parlant du verre à bouteilles.

§ 3. — Classification. — Compositions

Suivant la nature des bases qui entrent dans sa constitution, le verre prend des noms différents.

On peut diviser les verres en deux grandes classes :

1° Verres sans oxyde de plomb, qui se subdivisent en :
- Verre soluble
- Verre à bouteilles
- Verre à vitres
- Verre à glaces
- Verre de Bohême, crown-glass

2° Verres à oxyde de plomb, qui se subdivisent en :
- Cristal ordinaire
- Flint-glass
- Strass
- Émail

La composition de chacune de ces sortes de verre, prise en particulier, est loin d'être invariable comme l'est celle d'un composé chimique cristallisé et bien défini.

Néanmoins, comme chacune d'elles répond à un besoin déterminé et doit posséder les propriétés lui permettant de remplir, dans de bonnes conditions, le but auquel

on la destine, il ne peut exister, entre les diverses compositions susceptibles de fournir un verre de nature déterminée, que des variations relativement faibles.

Là où les variations sont le plus considérables, c'est dans la fabrication des produits communs, d'usage courant, très répandus dans le commerce, produits pour lesquels, aux yeux de la masse des consommateurs, la première condition à remplir est celle d'être peu coûteux.

En particulier, c'est surtout dans le verre à bouteilles qu'on rencontre des variations de composition très notables ; elles sont motivées le plus souvent par des qualités spéciales que le consommateur exige du produit, mais assez fréquemment aussi par des raisons d'ordre purement économique.

Dans le tableau ci-contre, page 11, nous donnons la composition de différents verres.

Le poids spécifique du verre dépend de sa composition : d'une manière générale les verres chargés de chaux sont les moins denses, et les verres à oxyde de plomb sont les plus lourds.

	Densité
Verre à bouteilles	2,732
Verre à vitres	2,642
Glaces de Saint-Gobain.	2,488
Crown-glass............	2,487
Verre de Bohême	2,396
Cristal..................	3,255
Flint-glass	3,600
Flint-glass de Faraday...	5,440
Verre au thallium.......	5,620

La réfraction est simple pour les verres bien recuits, refroidis très lentement; elle est double pour ceux qui sont refroidis rapidement ou comprimés. Les verres de plomb et de bismuth réfractent fortement la lumière,

	VERRE SOLUBLE de KUHLMANN	VERRES SOLUBLES	VERRE à BOUTEILLES	VERRE à VITRES	VERRE à GLACES	GLACES de SAINT-GOBAIN	CROWN de GUINAUD	CROWN ANGLAIS	VERRE de BOHÊME	CRISTAL	FLINT GLASS	STRASS	ÉMAIL
Silice	69	69,88	53,55	69,75	73,9	72,1	72,1	62,8	71,6	56,0	42,5	38,2	31,6
Chaux	»	»	29,22	13,31	3,8	12,2	9,7	12,5	10,0	2,6	0,5	»	»
Potasse	»	30,12	5,48	»	»	»	18,2	22,1	11,0	8,9	11,7	7,8	8,3
Soude	31	»	»	15,22	17,5	15,7	»	»	»	»	»	»	»
Magnésie	»	»	»	»	»	traces	»	»	2,3	»	»	»	»
Alumine et oxyde de fer	»	»	11,75	1,82	2,8	traces	»	2,6	6,1	»	1,8	1,0	»
Oxyde de plomb	»	»	»	»	»	»	»	»	»	32,5	43,5	53,0	50,3
Acide stannique	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	9,8
Oxyde de manganèse	»	»	»	»	»	»	»	»	0,2	»	»	»	»

sans cependant que leur degré de réfraction atteigne la valeur de celui que possèdent les corps à l'éclat adamantin.

	Coefficient de réfraction
Vide (pris pour unité)..........	1
Diamant......................	2,506
Cristal de roche à éclat vitreux.	1,547
Crown de Fraunhofer..........	1,540
Flint de Fraunhofer...........	1,637
Verre au thallium.............	1,710 à 1,965

Constitution des verres. — Nous avons dit que le verre était le résultat de l'association, par fusion, d'un silicate alcalin : de potasse ou de soude, jouant le rôle de fondant, de liant, avec un ou plusieurs silicates à base terreuse ou métallique, qui donnent à la substance la dureté et la résistance.

Que le verre — ce silicate à bases multiples — soit obtenu en partant des divers silicates simples, isolés au préalable, ou qu'on l'obtienne en fondant de la silice avec les diverses bases prises chacune en quantité convenable, le résultat final est le même.

Aussi, dans la pratique, se garde-t-on bien de préparer isolément les divers silicates qui doivent entrer dans la composition du verre. Ce mode d'opérer serait très onéreux ; il n'aurait d'ailleurs aucun avantage sur celui qu'on emploie, consistant à mélanger la silice aux bases et à laisser au feu le soin de former les combinaisons.

Le plus souvent même les bases sont introduites à l'état de sels, dont l'acide est éliminable par la chaleur ou par un agent n'exerçant aucune influence sur le verre.

C'est ainsi que, si l'on a en vue la fabrication du verre à vitres, qui est un silicate de soude et de chaux, au lieu de préparer tout d'abord, d'une part, du silicate de soude, d'autre part, du silicate de chaux, on se contente de soumettre à l'action du feu un mélange de sable, de calcaire et de carbonate de soude. Ce dernier sel est même le plus généralement remplacé par du sulfate de soude additionné de charbon de bois en poudre ou de houille menue.

Ce qui est à remarquer dans la constitution des verres, c'est que la silice, qui en forme l'élément acide, possède la propriété de se combiner aux bases dans des proportions extrêmement variables, sans qu'il soit possible par un examen sommaire d'établir la différence, quelquefois considérable, qui existe chimiquement entre les divers produits ainsi obtenus.

Sous ce rapport, le verre ne peut être comparé aux autres produits fournis par l'industrie. Pour ces derniers, en effet, la constance de composition s'impose si l'on veut avoir la constance d'aspect et de qualités, et il suffit le plus souvent d'un changement de quelques millièmes pour modifier profondément les caractères du produit.

Est-ce à dire qu'un changement de composition soit sans influence sur les caractères du verre, sur ses qualités de résistance? Évidemment non ; mais cette influence est assez peu marquée pour n'être pas sensible à première vue.

Les qualités du verre ne peuvent, en effet, être examinées par des procédés analogues à ceux auxquels on a recours pour l'essai de produits industriels, tels que le fer par exemple, sur la valeur duquel on peut être fixé quelques heures après sa fabrication, aussi bien par la

détermination de la quantité de matière utile qu'il contient que par des essais de résistance à la traction, à la flexion, etc.

Pour le verre, le temps seul est bon juge et peut permettre de résoudre la question capitale qui est celle de la durée, de la résistance que présentera le verre à l'action des agents contre lesquels, par destination, il aura à lutter.

On peut bien, il est vrai, déterminer rapidement la résistance à la flexion et aux chocs, et obtenir ainsi des indications de réelle valeur sur les propriétés physiques du verre ; mais, en ce qui concerne la résistance aux agents atmosphériques, le temps seul peut permettre d'établir quelle est la meilleure composition.

Pour certaines fabrications très anciennes et à composition invariable, la sanction du temps est acquise, et l'on peut affirmer, par exemple, que la composition des glaces de Saint-Gobain, celle du verre à vitres de Birmingham, correspondent chacune, pour la nature spéciale du produit, au maximum de résistance.

Ces verres étant remarquables par leur forte teneur en chaux, on est autorisé à considérer les verres pauvres en chaux comme n'étant pas, à proprement parler, de bons verres.

Partant de ce point de vue, Benrath a cherché à déterminer si la grande stabilité de ces verres de fabrication ancienne ne serait pas due à une combinaison rationnelle des éléments, dont les doses seraient convenablement réglées pour constituer une sorte de silicate bien défini.

Les observations nombreuses qu'il a faites l'ont amené à conclure que les verres réputés les meilleurs présentaient entre eux des analogies surprenantes et qu'ils se

rapprochaient tous d'une composition fondamentale ayant pour expression :

$$5 \left.\begin{matrix} K \\ N \end{matrix}\right\} O\ 3SiO^3 + 7\ CaO\ SiO^3$$

ce qui correspond, pour le verre à vitres et à glaces, à :

Silice	75,5
Soude	10,9
Chaux	13,6

Pour le verre de Bohême :

Silice	71,5
Potasse	15,5
Chaux	13,0

Pour le cristal la formule devient :

Silice	51,50
Potasse	11,20
Oxyde de plomb	37,30

ce qui correspond à :

$$5\ KO3\ SiO^3 + 7\ PbO.\ SiO^3.$$

Ces équations seraient, d'après Benrath, la formule chimique du verre normal ou à maximum de résistance, correspondante aux trois principaux groupes de verre.

Cet auteur considère le verre comme un composé défini plus ou moins pur, dont la valeur est d'autant plus considérable qu'il contient une plus grande quantité de verre normal. L'excédent, silice ou base, est considéré comme une impureté qui, à l'exemple de ce qu'on observe dans les produits commerciaux, ne peut que nuire aux qualités du produit.

VERRE ET VERRERIE

CHAPITRE PREMIER

ACTION DES AGENTS PHYSIQUES ET CHIMIQUES SUR LE VERRE

§ 1. — Agents physiques

1. — Action de la lumière. — On a depuis longtemps constaté que le verre change de coloration par une longue exposition à la lumière.

L'étude la plus complète se rapportant à ce sujet a été faite par M. Garfield, de Boston, qui, en 1863, commença une série de nombreux essais qui se sont poursuivis pendant de longues années.

Les expériences de M. Garfield ont porté sur un nombre considérable de verres de toutes provenances et de toutes formes : elles s'appliquaient aussi bien aux verres non colorés qu'aux verres de couleur, c'est-à-dire colorés dans leur masse.

Il prit pour champ d'expériences la toiture à châssis vitré de son habitation. Cette toiture, vaste plate-forme exposée toute l'année aux rayons solaires comme aux

2

intempéries, était parfaitement disposée pour ces observations.

M. Garfield a constaté les transitions de teintes suivantes :

Verres incolores :

1° Du blanc au jaunâtre ;

2° Du verdâtre au vert jaunâtre ;

3° Des teintes jaune, brun et verdâtre à diverses teintes de pourpre ;

4° Du blanc verdâtre au bleuâtre ;

5° Du bleuâtre à une teinte plus foncée de la même couleur.

Les verres non recuits ou trempés peuvent, comme les verres recuits, changer de coloration.

Le cristal ou verre à base de plomb est le seul dont la coloration ne soit pas modifiée.

Verres colorés dans la masse :

Les verres colorés dans leur masse par une des couleurs franches du spectre ne sont pas influencés par la lumière, à l'exception toutefois du violet qui est rendu un peu plus sombre.

Par contre :

1° Les teintes brunâtres deviennent couleur chair ;

2° La couleur chair passe aux teintes pourpre ou violet ;

3° L'ambre, l'olive et le pourpre prennent des teintes plus foncées des mêmes couleurs.

Il est à remarquer que les verres dont la coloration a été ainsi modifiée par une longue exposition à l'air et au soleil redeviennent incolores ou reprennent leur couleur primitive, si on les porte pendant quelque temps à la température du rouge sombre.

Une seconde exposition à la lumière produit une

seconde coloration semblable à la première, et la chaleur rouge la fait encore disparaître.

Ces phénomènes se reproduisent indéfiniment.

La possibilité de reproduire successivement et sans limite ces faits curieux de coloration et de décoloration successives constitue assurément un des points les plus curieux et les plus intéressants de l'histoire du verre.

L'explication de ces phénomènes a été donnée par Pelouze, le savant chimiste et éminent verrier, qui, bien avant les essais de M. Garfield, avait été frappé de ces variations de teinte du verre sous l'action de la lumière.

Nous n'entrerons pas ici dans le détail des expériences sur lesquelles Pelouze a appuyé ses conclusions ; nous nous contenterons de rappeler que ces expériences ont établi de façon irréfutable que :

1° Le verre préparé avec des matières chimiquement pures ne subit pas de changement de teinte ;

2° A poids égal de métal, le peroxyde de fer colore moins le verre que le protoxyde, et la coloration jaune qui se manifeste sous l'action solaire est infiniment plus intense que celle qui pourrait être produite par le fer contenu dans le même verre, en le supposant tout entier peroxydé ;

3° Il suffit d'une trace pour ainsi dire impondérable de sulfure pour colorer le verre en jaune.

S'appuyant sur ces faits d'expérience et sur la constatation que dans tous les verres du commerce on trouve simultanément du protoxyde de fer et du sulfate de soude, Pelouze a été amené à conclure que la lumière provoque entre ces matières une réaction d'où résultent du peroxyde de fer et du sulfure de sodium, double cause de coloration en jaune.

La décoloration par la chaleur d'un verre ainsi jauni au

soleil s'explique par ce fait que le fer, étant peroxydé, se trouve par conséquent propre à changer le sulfure en sulfate.

Nous venons de dire que le protoxyde de fer avait une puissance de coloration de beaucoup supérieure à celle du peroxyde. Cette circonstance est connue depuis longtemps des verriers à vitres ; aussi, quand une composition fournit un verre d'une nuance trop foncée pour être acceptable par le commerce, y ajoutent-ils du « savon des verriers », c'est-à-dire du bioxyde de manganèse en quantité calculée de telle manière que tout le fer passe au maximum et qu'il y ait un léger excès de bioxyde de manganèse.

Ce dernier donnant par lui-même au verre une coloration violette complémentaire de la coloration jaune donnée par le peroxyde de fer, les deux teintes se neutralisent, et il en résulte un verre incolore.

Malheureusement cette décoloration n'est pas de longue durée. En effet, lorsque la lumière vient frapper ce verre, elle exerce une action réductrice sur l'oxyde le moins chargé d'oxygène, celui qui est en moindre proportion, et l'oxyde opposé profite de cette élimination pour se peroxyder ; de là certaines colorations tantôt jaunâtres, tantôt verdâtres, dans des échantillons de même provenance. Ces inconvénients, qui avaient une certaine gravité dans l'emploi du verre à la photographie, ont amené presque tous les verriers à renoncer à l'emploi du bioxyde de manganèse et à rechercher la blancheur par l'emploi de matières premières pures.

Nous rappellerons ici combien cette action de la lumière a causé d'ennuis aux verriers du commencement de ce siècle, qui cherchaient vainement à reproduire les vitraux anciens.

Plus heureux que leurs aînés, nos verriers actuels connaissent la véritable cause de ces belles teintes fondues et veloutées; ils disposent, en outre, de moyens qui faisaient défaut à leurs prédécesseurs : ils ont en effet le secours de l'analyse chimique et, d'autre part, mettant à profit l'expérience acquise, ils peuvent éviter tout tâtonnement en faisant renaître sous l'action de la chaleur la couleur primitive du verre qu'ils veulent reproduire.

Athermanisme du verre. — On sait que toute source incandescente émet deux sortes de radiations lumineuses et calorifiques. On a cherché souvent, et il y a intérêt à trouver dans bien des cas, le moyen d'absorber les radiations calorifiques, tout en laissant passer les radiations lumineuses.

On s'est servi à cet effet d'une solution d'alun, qui passe pour absorber toute la partie obscure du spectre ; on a reconnu depuis que la réputation de ce liquide était usurpée et que l'eau pure était un absorbant au moins aussi efficace.

En ce qui concerne les verres, il y avait lieu de rechercher si certaines colorations obtenues par l'introduction d'oxydes métalliques dans leur composition ne produiraient pas l'effet désiré; on pouvait se demander en même temps si la composition d'un verre même non coloré, suivant la nature des éléments composants ou suivant leurs proportions, ne posséderait pas à un degré plus ou moins élevé cette propriété intéressante.

Les verres colorés par l'oxyde d'urane à faible dose (1 0/0), donnant par suite une coloration peu intense à l'épaisseur à laquelle sont travaillés les verres pour la lunetterie, ont été regardés comme absolument efficaces et propres à protéger, par exemple, les yeux des explorateurs

appelés à voyager pendant de longues heures au milieu des sables brûlants du désert.

Les expériences directes entreprises par nous n'ont pas confirmé l'existence de cette propriété, même sous une épaisseur plus grande que celle adoptée pour la lunetterie.

M. Zsigmondy a, dans un travail récent, repris la question au point de vue de l'influence de la composition élémentaire du verre et, se basant sur les propriétés que possédaient soi-disant les solutions d'alun dont il a été déjà parlé, il a cherché si l'introduction de l'alumine dans le verre ne produirait pas un effet analogue; les résultats qu'il a obtenus semblaient confirmer cette présomption, quand il s'est aperçu que le fer, dont il est si difficile d'éviter la présence dans les compositions vitrifiables, paraissait avoir une influence considérable et que, en réalité, les résultats intéressants obtenus étaient dus à la présence de ce dernier métal. Ils ont été corroborés par les observations faites ultérieurement par lui sur les sels de fer doubles, presque incolores, tels que le sulfate ferro-ammoniacal, d'après lesquelles le pouvoir absorbant ainsi donné ne dépend que de la quantité de fer en solution et nullement du corps auquel il est combiné.

Le tableau suivant indique la proportion de chaleur émanée d'une lampe d'Argand dont les rayons traversent une cuve remplie d'eau de diverses solutions de sel de fer.

D'après le même expérimentateur, les verres contenant du sesquioxyde de fer seraient encore plus athermanes que les solutions de sels ferreux; ainsi, tandis que, sous une épaisseur de 7 à 8 millimètres, le verre à miroir laisse passer plus de 60 0/0 de la radiation d'une lampe d'Argand, un crown contenant 1 0/0 de sesquioxyde de fer

arrêterait 99,3 0/0 de la radiation, et l'on ne constaterait aucune chaleur appréciable derrière un écran de 8 millimètres formé du même verre, contenant 2 0/0 du même oxyde.

TENEUR EN FER 0/0	CUVE DE 9,5 MILLIMÈTRES		CUVE DE 24 MILLIMÈTRES	
	CHLORURE DE FER	SULFATE DE FER	CHLORURE DE FER	SULFATE DE FER
1,4	6,7	6,7	2,7	2,6
0,7	8,9	8,9	4,5	4,5
0,55	10,3	10,3	6,2	6,1
0,175	10,9	10,9	7,2	7,2
0,000	12,2	12,2	8,6	8,6

Les observations auxquelles nous nous sommes livrés, il y a plusieurs années, à la suite d'accidents survenus en Angleterre, et sur la cause desquels nous avions été consultés, confirment sur certains points les conclusions de M. Zsigmondy; elles nous ont permis de préciser, de plus, les conditions dans lesquelles le fer agissait étant incorporé dans le verre, ainsi que les causes qui produisaient ce phénomène d'athermanisme.

Il en résulte en effet que cette propriété, donnée au verre par le fer, est variable selon l'état d'oxydation dans lequel il se trouve et que, même en proportion très faible, et c'est évidemment là où est le véritable intérêt de ces études, des verres étaient athermanes quand le fer s'y trouvait à l'état de sesquioxyde, tandis que des verres de même composition élémentaire, et dans lesquels le fer entrait en mêmes proportions, mais à l'état de protoxyde et par conséquent notablement plus coloré, puisque la sesquioxyde de fer et le protoxyde de fer colorent le

verre dans la proportion de 1 à 2 1/2, étaient diathermanes.

Voici l'explication que nous avons cru pouvoir en donner :

La coloration en vert jaune bouteille donnée par le fer correspond à son introduction dans une composition de nature oxydante ; par suite, tous les oxydes des métaux qui peuvent s'y être adjoints, et en particulier le manganèse — et, quelque faible qu'en soit la proportion, il en existe toujours, ne serait-ce qu'à l'état de traces, — sont eux-mêmes au maximum d'oxydation, donnant dans ces conditions leur maximum de coloration.

La teinte vert jaune du verre est donc presque toujours une teinte composée, formée de plusieurs couleurs se neutralisant et donnant comme résultante une teinte neutre faisant pour ainsi dire le fond et à laquelle s'adjoint comme dominante la teinte verte de l'oxyde de fer au maximum ; avec le protoxyde de fer la coloration au contraire est *une*, sans adjonction de teinte neutre, les teintes données par les autres oxydes, et en particulier par le manganèse, étant annulées.

On peut se rendre compte *a priori* de la différence de transparence de ces deux natures de verre en les comparant tous deux sous une épaisseur de quelques centimètres ; le verre au protoxyde de fer laisse passer les rayons avec une facilité infiniment plus grande.

Ce moyen de comparaison permet même de préjuger des qualités possibles d'athermanisme ou de diathermanisme d'un verre de coloration déterminée.

Il en résulte de plus que la moindre addition de manganèse destinée, dans une composition oxydante, à *savonner* le verre pourra rendre le verre athermane, ce qui pour beaucoup d'applications peut être un inconvénient.

En effet, l'athermanisme d'un verre a pour conséquence l'échauffement de la pièce qu'il a servi à fabriquer ; cet échauffement peut être considérable et n'être pas sans inconvénients quand il s'agit de pièces de verre posées dans le voisinage de foyers lumineux puissants.

Nous avons eu occasion de comparer la température de pièces de verre employées dans ces conditions, les unes fabriquées avec un verre athermane, les autres avec un verre diathermane, regardés tous deux comme incolores ; tandis que la température des premières était élevée à plus de 200°, celle des secondes n'était que de 30° au bout de plusieurs heures de fonctionnement de l'appareil.

2. — Action de la chaleur sur le verre. Fusibilité. — On a constaté qu'un mélange de silicates se comportait comme un mélange de sels et comme un alliage métallique. En effet, si l'on prend deux silicates à points de fusion déterminés et qu'on les associe, on obtiendra un verre qui sera fusible à une température inférieure à celle qui représente la moyenne des températures de fusion des deux silicates composants.

On trouve donc dans les silicates une nouvelle confirmation de la loi de Berthier, à savoir :

Un mélange de sels est d'ordinaire plus fusible que les sels qui lui ont donné naissance.

Cette constatation a son importance, car elle permet de voir qu'il est possible, dans de certaines limites, d'augmenter la fusibilité d'un verre en faisant en sorte que les bases soient constituées par un mélange complexe.

On a remarqué, d'autre part, qu'un verre à bases

multiples se comporte beaucoup mieux, au point de vue de la stabilité, de la facilité avec laquelle il se laisse travailler, qu'un verre dans lequel n'entre qu'une seule base terreuse.

3. — Dévitrification. — Si on chauffe du verre pendant un temps assez prolongé, à une température un peu inférieure à celle de sa fusion, mais voisine de son point de ramollissement, on constate dans la tranche de ce verre qu'il se produit de petites aiguilles. Le verre est cristallisé ou « dévitrifié ».

Sous cet état, le verre ressemble tout à fait à la porcelaine ; aussi lui donne-t-on quelquefois le nom de porcelaine de Réaumur. Il a perdu toute sa transparence et ne se laisse plus couper au diamant ; il conduit mieux la chaleur et l'électricité.

Sous l'action prolongée de la température élevée à laquelle il est nécessaire de maintenir le verre, on pourrait admettre que le poids diminue par évaporation d'une partie des alcalis, ou qu'il augmente par incorporation des gaz du foyer.

Il n'en est rien cependant. Ce verre soumis de nouveau à la fusion redevient transparent, en conservant toujours le même poids.

Les aiguilles de verre dévitrifié sont perpendiculaires à la surface, ce qui indique que la dévitrification prend naissance en ces points superficiels. On en a d'ailleurs une preuve plus convaincante si le verre a été soustrait un peu hâtivement à l'action du feu ; dans ce cas, en effet, on retrouve, au centre de la pièce, une zone plus ou moins épaisse de verre encore transparent.

Dans quelques cas très rares, la texture du verre dévitrifié, au lieu d'être fibreuse, se présente sous forme

granuleuse, à cassure saccharoïde, ce qui donne au verre l'aspect du marbre blanc.

Tous les verres, y compris le cristal, sont susceptibles de dévitrification, mais ce phénomène est surtout accentué dans les verres à base de soude.

On a constaté qu'un excès de bases : chaux, magnésie, augmentait la tendance à la dévitrification.

On avait attribué uniquement à la chaux, dans les verres à deux bases : soude ou potasse et chaux, la propriété d'amener la dévitrification ; mais il est parfaitement établi qu'un excès de silice peut jouer le même rôle.

La dévitrification est un phénomène analogue à celui de la sursaturation des substances salines. C'est ainsi qu'on peut provoquer et rendre complète la dévitrification — dans des conditions où normalement elle ne se produirait que de façon incomplète — en introduisant dans du verre fondu une substance étrangère, à point de fusion élevé, ou même de la poudre de verre.

L'expérience suivante montre l'exactitude de cette assertion. On a laissé dans un four deux pots à moitié remplis de verre fondu et on a cessé de chauffer ce four ; lorsque la matière est devenue pâteuse, on a ajouté dans l'un des pots une très petite quantité de matières vitrifiables. Après refroidissement du four, on a constaté que, dans le pot où on n'avait rien ajouté, le verre n'avait subi qu'un léger commencement de dévitrification, tandis que dans l'autre la masse était entièrement opaque et remplie de noyaux cristallins.

On avait pensé que ces noyaux cristallisés, existant dans la masse du verre dévitrifié, étaient constitués par un silicate de nature différente de la masse totale et dont il serait possible d'établir par l'analyse la composition chimique.

De nombreuses analyses ont été faites dans le but de résoudre cette question.

Nous donnons plus loin celle qui a été effectuée sur un verre à bouteilles, dans lequel la dévitrification avait donné naissance à des masses sphériques d'un volume considérable.

	PATE DÉVITRIFIÉE	PATE TRANSPARENTE	DIFFÉRENCES
Silice	63,79	64,39	— 0,60
Alumine	7,73	7,42	+ 0,31
Protoxyde de fer	1,39	1,39	0,00
Protoxyde de manganèse	2,49	2,47	+ 0,02
Chaux	13,38	12,81	+ 0,57
Magnésie	0,61	0,73	— 0,12
Soude	9,76	9,78	— 0,02
Potasse	1,52	1,45	+ 0,07
	100,67	100,44	

Comme on le voit, la différence entre la composition chimique des deux parties est très faible, ce qui confirme la manière de voir de Pelouze, à savoir que le verre dévitrifié présente la même composition que la masse dont il provient.

On s'explique d'ailleurs facilement qu'il en soit ainsi : la masse dans laquelle les cristaux prennent naissance est trop peu fluide pour que les produits de séparation puissent s'isoler suffisamment, de façon qu'il soit possible d'en faire la séparation mécanique.

L'analyse porte donc à la fois sur le cristal et sur l'eau mère, c'est-à-dire sur la composition entière du verre.

Cependant, si l'analyse chimique est impuissante et ne permet pas d'élucider la question, on a pu, du moins,

obtenir des indications suffisamment nettes de l'analyse partielle.

Le verre dévitrifié s'attaque beaucoup plus facilement que le verre ordinaire par l'acide chlorhydrique. Opérant ainsi par comparaison, on est arrivé à conclure que le verre dont nous avons donné plus haut l'analyse contenait dans cent parties :

18,32 matière dévitrifiée (monosilicate de chaux)
81,68 masse vitreuse amorphe.

La dévitrification consisterait donc dans la séparation, au sein de la masse du verre, d'un silicate de chaux. Ceci étant, il est à supposer que ce silicate préexistait à cet état dans le verre fondu, ce qui donne beaucoup de vraisemblance à cette hypothèse d'après laquelle les verres seraient, non pas des combinaisons chimiques, mais bien des solutions de silicates cristallisés dans des silicates amorphes.

4. — Dilatation. Retrait. Recuisson du verre. — Pendant le refroidissement normal du verre, on observe une diminution notable du volume. Le verre est donc, comme toutes les substances, susceptible de se dilater et de se contracter sous l'influence des variations de température. Ces mouvements moléculaires ont même une amplitude suffisamment grande pour qu'on ait dû s'en préoccuper et en tenir compte dans les applications du verre, surtout dans celles où il doit subir des variations de température notables, comme dans la construction des thermomètres, des aréomètres, etc.

En outre, la grandeur des mouvements moléculaires est variable avec la composition chimique du verre.

C'est ainsi qu'on a trouvé que le coefficient de dilatation linéaire est :

Pour le verre	ordinaire	0,000008969
»	en règle	0,000008613
»	à glaces de Saint-Gobain	0,000008909
Pour le flint		0,000008167

La détermination du coefficient de dilatation cubique a donné les chiffres suivants, entre 0 et 100° :

Verre blanc	de soude	0,000025839
»	de potasse	0,000022850
»	en tubes	0,000026480
»	en boule de 5 centimètres	0,000025920
Verre vert en tubes		0,000022990
Verre à vitres ordinaire		0,000024310 0,000027580
Cristal de Choisy-le-Roi		0,000022800

On a remarqué depuis longtemps que dans les thermomètres, même les mieux construits, il se produit, à la longue, un déplacement du zéro. Jusqu'en ces derniers temps, on attribuait ce déplacement du point fixe à la seule contraction de la boule du thermomètre.

M. Crafts a repris cette étude et a reconnu qu'à cette cause d'erreur — présentant en somme peu de gravité, car il est facile une fois pour toutes de la déterminer et d'en tenir compte — il convenait d'en ajouter une autre beaucoup plus importante, qui est la variation du coefficient de dilatation lui-même.

Il en résulte que l'intervalle entre les deux points fixes varie d'une façon irrégulière, ce qui rend la graduation inexacte.

Des thermomètres chauffés à 355° ont eu leur coefficient de dilatation diminué, de sorte que, pendant que le zéro est monté de t°, le point 100, au lieu de se trouver à $100 + t$, est monté à $100 + t + t'$.

Les valeurs du coefficient de dilatation étaient les suivantes :

De 0 à 100° :

K^a (coefficient avant le chauffage)....	0,00002788
K^b (coefficient après le chauffage).....	0,00002743

De 0 à 216° :

K^a (coefficient avant le chauffage).....	0,00002979
K^b (coefficient après le chauffage).....	0,00002914

On a remarqué que la variation des coefficients de dilatation est plus considérable et en même temps plus irrégulière dans les thermomètres dont le réservoir est constitué par une boule soufflée que dans ceux où ce réservoir est formé d'un tube.

Ce fait paraît résulter des divers degrés de tension produits dans la boule pendant le soufflage et dont nous aurons occasion de dire un mot quand nous nous occuperons de la trempe du verre.

En raison de la variation des points fixes, on a dû, dans les opérations exactes, faire usage de thermomètres à échelle limitée, c'est-à-dire ne donnant d'indications qu'entre deux points choisis comme limites.

D'autre part, on atténue les effets indiqués plus haut en portant les thermomètres, vides de mercure, à une haute température et en les y maintenant pendant plusieurs jours, puis en les laissant refroidir très lentement.

On est arrivé, dans ces conditions, à obtenir des thermomètres pour lesquels les variations n'excèdent pas 1°, alors que dans certains cas elles atteignent 8 et même 10°. Des variations de cette importance sont constatées surtout sur les thermomètres qui pendant très long-

temps sont soumis à une température élevée ; mais même pour des températures inférieures à 100° on peut avoir, dans certaines conditions particulièrement désavantageuses, des variations très notables résultant de déformations produites dans le verre.

Un exemple remarquable de déformation de ce genre est celui d'aréomètres immergés dans des osmogènes au sein d'un liquide chauffé à 95°, de densité 1,014, contenant par litre 115 grammes de sucre et 91 grammes de sels de potasse (chlorures de potassium et sels à acides organiques).

Après quelques jours d'immersion dans ce liquide, les aréomètres sont complètement modifiés, perdent de leur poids et accusent des erreurs en plus de 7 à 8° Baumé. En outre, les flotteurs sont déformés, ondulés, boursouflés et finissent par se fendre par un séjour plus prolongé.

Soit dit en passant, cette constatation donne plus de force aux objections qui ont été élevées contre l'assimilation des aréomètres aux instruments de poids et mesures légaux vérifiés et poinçonnés par le Gouvernement.

Nous avons dit qu'on atténuait les variations de volume des objets en verre en les laissant refroidir très lentement après les avoir portés à une température élevée. Ce refroidissement très lent est une condition indispensable et permet seul aux molécules du verre de prendre une position d'équilibre stable.

L'ensemble de ces opérations de réchauffage et de refroidissement constitue la phase du travail du verre connue sous le nom de recuisson.

Nous insistons sur la nécessité absolue de procéder à cette recuisson avec la plus grande lenteur possible.

4 *bis*. — **Trempe du verre.** — Que se passe-t-il si,

prenant une pièce en verre chaud, encore malléable, on vient à la refroidir brusquement, en la plongeant par exemple dans un liquide froid.

Le premier effet du contact avec le corps froid est de solidifier les parties superficielles sur une profondeur d'autant plus considérable que la température du bain est plus basse.

Ces molécules superficielles se contractent, mais elles sont arrêtées dans ce mouvement par les parties intérieures encore chaudes et qui par suite n'ont pas encore pris leur retrait. Dans le refroidissement ultérieur, les parties centrales, seules susceptibles de mouvement, ne pouvant attirer à elles les parties superficielles devenues rigides, sont au contraire attirées par ces surfaces, et il en résulte dans le centre de la pièce un vide ou tout au moins une dilatation de la masse.

Nécessairement, dans ces conditions, la pièce de verre trempé occupe un volume plus considérable que celui qu'elle aurait eu si elle avait été refroidie lentement.

Souvent même il existe au centre de la pièce un vide plus ou moins considérable, qui peut atteindre dans des pièces de grandes dimensions un volume égal au centième du volume de la pièce.

Même s'il n'existe pas de vide à l'intérieur de la pièce de verre trempé, on comprend que la trempe a pour résultat de placer le verre dans un état d'équilibre instable tel que les molécules ont tendance à occuper leur position normale en se rapprochant vers le centre, si cet équilibre vient à être rompu sous une action mécanique.

Les larmes bataviques, qu'on obtient en laissant tomber dans l'eau froide une goutte de verre très fluide, ne sont autre chose que du verre trempé à un très haut degré. On sait combien elles sont fragiles ; il suffit d'en

briser la pointe pour voir la masse entière éclater avec bruit et se résoudre en une infinité de morceaux.

Dans le but d'établir l'état moléculaire du verre trempé, M. de Luynes a fait des expériences très intéressantes sur les larmes bataviques.

Il a reconnu qu'on peut couper à l'acide toute la queue AB d'une larme batavique sans en amener la rupture (*fig.* 4).

L'explosion ne se produit que quand on arrive au col de la larme en A, c'est-à-dire au point de divergence de la poire.

Fig. 4.

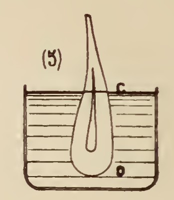


Fig. 5.

De même, on peut, sans amener la rupture, ronger à l'acide toute la partie renflée CD d'une larme (*fig.* 5), à la condition de soustraire à l'action de l'acide toute la queue et la partie du col se rattachant à la poire.

Ces deux expériences prouvent d'abord que la stabilité de la larme dépend surtout de l'existence des parties de verre qui constituent l'origine du col, et en second lieu qu'en respectant ces parties on peut enlever successivement toutes les couches extérieures de la larme sans que la rupture ait lieu, ce qui semble bien annoncer que l'existence de ces couches n'est pas nécessaire au maintien de l'équilibre.

Par contre, si on use sur le plateau d'un tour l'extrémité renflée d'une larme (*fig.* 6), on constate inévitablement la rupture; de même, si l'on essaye de scier cette extrémité. Dans les deux cas, la rupture se produit au moment où, mettant à nu le noyau central, on rend aux couches superficielles la liberté de se mouvoir.

Puisque toutes les molécules superficielles sont dépla-

cées, il doit en résulter une différence dans l'arrangement de ces molécules après la rupture. On observe en effet, généralement, que les parties voisines de la queue forment des cônes dont le sommet est dirigé vers la partie renflée, l'inverse ayant lieu pour les parties voisines de ce renflement (*fig.* 7).

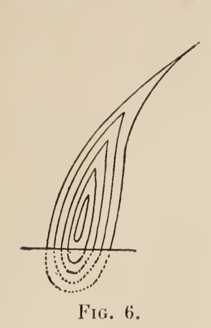


Fig. 6.



Fig. 7.

Les larmes bataviques peuvent donc être considérées comme une masse de verre dont les parties internes sont dans un état de dilatation forcée, état analogue à celui que M. Berthelot a observé pour certains liquides.

Cette hypothèse est confirmée par les faits suivants :

1° Le verre trempé a une densité plus faible que le verre bien recuit ;

2° Les couches intérieures sont moins denses que les couches superficielles.

A l'appui de cette manière de concevoir la constitution des larmes bataviques, nous rappellerons qu'on a constaté que leur rupture est toujours accompagnée d'un dégagement de chaleur.

Caractères du verre trempé. — Le verre trempé a, sur la lumière polarisée, une action que ne possède pas le verre bien recuit, et qui est d'autant plus marquée que la trempe est plus accentuée.

Cette action est exactement la même que celle que peut produire le verre bien recuit soumis à une action mécanique qui le comprime. La seule différence est que, dans ce dernier cas, la propriété d'agir sur la lumière polarisée cesse quand l'action mécanique disparaît.

Quand on examine une lame de verre trempé à la lumière polarisée, on aperçoit une croix noire dans les parties où le verre est resté à l'état naturel. On peut donc, en marquant ces points, scier le verre ou percer des trous suivant ces directions sans briser la lame. Dans les lames circulaires, le centre est un point neutre à trempe beaucoup moins forte.

On constate très généralement, dans le verre trempé, la présence de bulles volumineuses qu'on n'aperçoit pas au moment du coulage ou du moulage de la pièce, et qui ne se développent que par la trempe.

Si on recuit le verre, les bulles disparaissent ou, mieux, sont ramenées à un volume tellement faible qu'il faut avoir recours à la loupe pour les apercevoir. Une nouvelle trempe fait de nouveau réapparaître les bulles avec leur volume primitif.

Certains physiciens avaient pensé que ces bulles étaient causées par le retrait de la masse intérieure du verre, après la solidification de la surface. S'il en est ainsi, on doit pouvoir les obtenir avec du verre parfaitement affiné; or il n'en est rien et l'expérience suivante le démontre.

Si dans un bloc de verre trempé présentant des bulles on sépare par sciage, après recuisson, les parties exemptes de bulles et qu'on trempe à nouveau ces parties, on n'y voit pas apparaître de bulles. Ce n'est donc pas un vide qui se produit, mais plutôt une dilatation considérable des bulles gazeuses retenues par le verre incomplètement affiné.

On a constaté que la trempe augmente dans de notables proportions la flexibilité du verre et lui communique une résistance qu'il est loin d'avoir à l'état normal.

Un verre trempé ne se brise que sous l'action d'un choc violent ou d'un chauffage inégal de ses diverses parties. La

cassure ressemble à celle des larmes bataviques quand la trempe est très prononcée : une trempe douce donne, au contraire, une cassure à arêtes arrondies.

Les chiffres suivants permettront de se rendre compte de l'élasticité que possède le verre trempé comparativement au verre ordinaire.

Un poids de 270 grammes a cassé une lame de verre non trempé en tombant de 1 mètre de hauteur ; le même poids tombant de 4 mètres ne casse pas le même verre trempé.

Un poids de 500 grammes tombant d'une hauteur de 1 mètre casse une glace en verre ordinaire recuit, tandis que le même poids tombant d'une hauteur de 4 mètres ne produit aucun effet sur le même verre trempé.

Applications du verre trempé. — On a naturellement cherché à tirer parti des propriétés qu'acquiert le verre sous l'action de la trempe. Il est regrettable que l'application de la trempe aux verres de toitures et aux vitres — qui serait la plus intéressante, puisqu'elle utilise surtout l'élasticité du verre — n'ait pu être généralisée.

L'impossibilité de couper au diamant le verre trempé obligeait en effet à ne tremper ces pièces qu'après les avoir découpées, d'où nécessité de s'en tenir à la fabrication de certaines dimensions. D'autre part, le double chauffage augmentait le prix de revient.

Aussi la trempe est-elle uniquement pratiquée pour les objets moulés, objets de gobeleterie, verres de lampes, et encore pour ce dernier usage l'application est-elle restreinte par suite des sérieux dangers qu'elle présente.

Quoi qu'il en soit, en raison des curieuses propriétés que la trempe communique au verre, nous ne quitterons pas ce sujet sans dire quelques mots sur les conditions

dans lesquelles s'effectue industriellement la trempe du verre.

De l'influence de la nature du verre et de sa température sur la trempe. — La trempe ayant pour effet de contracter énergiquement les molécules extérieures du verre, ce phénomène s'accomplira dans des conditions d'autant meilleures que les molécules auront entre elles moins de cohésion.

Plus le verre sera malléable et se rapprochera de l'état pâteux, plus les molécules se déplaceront facilement pour se grouper suivant une certaine loi. La température minima est donc celle qui correspond au point de ramollissement du verre.

La limite maxima est donnée par ce fait qu'il faut éviter de déformer les pièces.

De cet ensemble de faits, il résulte que la température de trempe est variable pour chaque nature de verre.

D'autre part, puisque la trempe est d'autant plus forte que le refroidissement est plus brusque, on comprend qu'il faille éviter d'aller trop loin dans cette voie et de faire usage de bains trop froids, car si le déplacement des molécules est par trop accentué la rupture est inévitable.

Pour que la trempe soit uniforme, quel que soit le verre sur lequel on opère, il faut conserver un écart constant entre la température du verre et celle du bain.

La température de ce dernier variera donc avec la température de ramollissement du verre, c'est-à-dire avec sa composition chimique. On peut dire, en général, que le bain doit être d'autant plus chaud que le verre aura un point de fusion plus élevé : c'est ainsi que pour le cristal on donne au bain de trempe une tempéra-

ture comprise entre 60° et 120°, tandis que pour le verre ordinaire cette température doit varier entre 150 et 300°.

Une condition indispensable est que le verre soit également chaud en tous les points de sa surface, qu'il soit parfaitement homogène et absolument exempt d'impuretés, infondus ou larmes, dont la présence apporterait un trouble dans le retrait.

Composition du bain de trempe. — La composition du bain de trempe a une influence notable, ainsi que l'a démontré M. de la Bastie, l'inventeur des procédés de trempe, qui a fait sur ce sujet une étude très approfondie. Il a déterminé le coefficient de solidité que chaque liquide donne au verre.

Dans l'eau le verre se brise presque toujours, tandis que dans l'huile ou les bains de graisse on obtient en général de très bons résultats.

La graisse épurée est employée pour la trempe du cristal de préférence à l'huile, cette dernière rendant les nettoyages plus dispendieux.

Pour le verre, la graisse seule ne peut plus être employée à cause de son point d'ébullition relativement bas ; on a recours à un mélange de trois quarts d'huile de lin et un quart de graisse.

Un bain de graisse qui ne serait pas parfaitement homogène, qui contiendrait des impuretés ou la plus petite quantité d'eau serait impropre à la trempe. C'est pourquoi la graisse nouvelle n'est jamais employée ; on lui fait subir au préalable un chauffage prolongé — pendant quatre ou cinq jours — à la température de 150°. Elle sert ensuite indéfiniment et est d'autant meilleure qu'elle est plus ancienne.

Manière de tremper les objets de gobeleterie. — La pièce terminée est réchauffée uniformément, puis retirée de l'ouvreau et détachée ensuite du pontil par un petit coup donné sur la tige, à l'aide d'un coin en bois. Elle est reçue dans un panier en treillis, qui lui-même est plongé dans le bain de graisse ou d'huile.

Ces paniers sont généralement de grandeur suffisante pour recevoir les produits qu'un ouvrier peut fabriquer en deux heures.

Trempe des carafes. — Pour les carafes et les récipients à col étroit, il se présente une difficulté pour réaliser l'introduction instantanée du liquide à l'intérieur. On a résolu le problème en faisant usage d'un siphon.

Nettoyage des objets trempés. — Après refroidissement dans le bain de graisse ou d'huile, les objets sont mis à égoutter sur des claies en treillis de fils de fer, puis passés dans un bain de soude caustique chauffé à 60° et ensuite rincés à l'eau à plusieurs reprises.

Le nettoyage des objets trempés à l'huile ne peut être effectué qu'à l'aide de l'essence de térébenthine.

Autres procédés de trempe

Verre durci par compression. — Le procédé que nous venons d'indiquer a l'inconvénient de ne pouvoir s'appliquer à de grandes dimensions et d'amener très fréquemment la déformation des pièces.

Siemens, de Dresde, ayant en vue surtout l'application de la trempe au verre à vitres, eut l'idée de refroidir les surfaces entre des plaques de terre cuite.

Ce procédé, qui constitue à la fois un mode de fabrica-

tion du verre, puisque les deux plaques forment un véritable moule, donne de très bons résultats et a permis, comparativement au procédé de M. de la Bastie, d'abaisser le prix de revient du verre trempé.

Malheureusement, il n'est applicable qu'aux objets de formes simples.

Le verre durci de compression possède une résistance de beaucoup supérieure à celle que présentent les autres verres trempés ; sa cassure est tout à fait différente, elle est fibreuse et non cristalline. Il ne se laisse pas non plus couper au diamant.

Verre trempé au moyen de la vapeur. — Pénétré des avantages que l'on peut retirer de l'emploi de la trempe, M. Léger a cherché à rendre ce procédé applicable à la fabrication de tous les verres, quelles que soient leurs dimensions et leur forme. Il préconise l'emploi de la vapeur ; ce moyen de trempage a l'avantage de s'appliquer avec une simplicité et une économie d'outillage qui n'apportent aucune modification aux installations et aux pratiques habituelles de l'industrie verrière.

On peut, en trempant le verre au moyen de la vapeur, tripler et quadrupler sa résistance et lui donner, sous ce rapport, des qualités comparables à celles de la fonte. La résistance à la traction peut en effet atteindre 11 à 12 kilogrammes par millimètre carré, celle de la fonte étant de 12 kilogrammes. L'élasticité et la sonorité croissent dans une proportion analogue.

M. Léger applique la trempe, non seulement au verre, mais encore aux objets de poterie, briques, carreaux, dont la cohésion est ainsi accrue dans de notables proportions. Ces objets sont rendus beaucoup moins fragiles et acquièrent une grande résistance à l'écrasement et à l'usure.

Application du verre trempé à la fabrication de traverses de chemins de fer. — Une application très curieuse du verre trempé a été faite par M. Hamilton Lindsay Bucknall, qui, le premier, eut l'idée de faire usage du verre trempé pour la construction des traverses et des coussinets de chemins de fer.

Les pièces sont fabriquées dans des moules creux de construction originale. On protège les faces du moule du contact direct avec le verre en les recouvrant d'un treillis de toile métallique ; d'autre part, les parois du moule sont d'épaisseur variable suivant qu'elles correspondent à des parties enflées ou étranglées de l'objet à fabriquer.

C'est ainsi qu'aux endroits qui sont en regard des parties amincies de la pièce on donne au moule le maximum d'épaisseur, et inversement.

Par ce moyen, en faisant circuler un courant d'eau froide dans l'intérieur du moule, on provoque un refroidissement rapide, en même temps qu'uniforme, de toutes les parties de la pièce de verre.

La résistance des traverses ainsi obtenues serait très considérable, supérieure même à celle des traverses en fonte, ainsi qu'en donnent la preuve les résultats ci-après.

On a trouvé que, placées sur deux supports distants de $0^{m},45$, elles résistaient à une charge d'environ 766 kilogrammes par centimètre carré.

Dans les essais exécutés à l'usine de M. Henderson d'Irvine, un poids de 450 kilogrammes tombait sur une plaque de verre de $0^{m},225$ de côté et de 28 millimètres d'épaisseur, placée sur un ballast en gravier de $0^{m},225$ de profondeur. Un coussin en bois de 3 millimètres étant placé entre le verre et le rail, la hauteur de chute fut portée successivement de $0^{m},30$ à $1^{m},65$, $2^{m},10$, $3^{m},75$, $4^{m},50$ et 6 mètres sans qu'il se produisît de rupture.

Le rail se brisa par cette dernière hauteur, et, comme la grue ne pouvait soulever le poids plus haut et qu'on ne pouvait employer un poids plus lourd, on prit un rail à section plus faible. Dans ces conditions, le verre fut rompu avec une hauteur de chute de 6 mètres.

Dans les mêmes conditions, une plaque de fonte de $0^{m},225$ de côté, épaisse de 13 millimètres, se brisa par une hauteur de chute de 3 mètres.

Le prix de revient de ce verre trempé ne dépasse pas celui de la fonte ; si, d'autre part, on tient compte de la faible densité du verre et de ses qualités de résistance à l'action des agents atmosphériques, on est amené à penser que l'application du verre trempé est appelée à un grand avenir.

5. — Résistance du verre aux actions mécaniques. Flexion. — Les essais faits sur les différents verres ont donné les résultats suivants :

DÉSIGNATION	DENSITÉ	COEFFICIENT D'ÉLASTICITÉ par MILLIMÈTRE CARRÉ	RÉSISTANCE A LA TENSION par MILLIMÈTRE CARRÉ
Verre à vitres......	2,523	9,917	1,769
Glace..............	2,467	7,015	1,400
Verre blanc exempt de plomb........	2,450	6,890	1,002

Nous avons dit que, par la trempe, les propriétés élastiques du verre étaient considérablement augmentées. Nous regrettons de ne pouvoir donner de chiffres précis établissant cet accroissement.

Ces chiffres sont en effet très variables suivant le degré de trempe; cependant, d'une façon générale, nous pouvons indiquer qu'une trempe moyenne donne au verre

une résistance triple de celle que possède le même verre non trempé.

Résistance à la pression. — Pour certains objets, tels que les bouteilles, on doit se préoccuper surtout de leur résistance à la pression.

Des bouteilles en verre trempé présenteraient, à n'en pas douter, une résistance considérable à la pression, mais, comme il suffirait que le cordon d'une bouteille se trouvât être ébréché, même légèrement, pour amener la rupture, on a dû renoncer à leur emploi, cependant très rationnel, pour le tirage des vins de Champagne.

Nous ne nous occuperons donc que des objets en verre recuit, et en particulier de la résistance que présentent les bouteilles à la pression intérieure.

Il est facile de démontrer que les bouteilles subissent, comme tous les corps élastiques soumis à l'influence de la pression, des changements de capacité qui sont proportionnels à cette pression.

Si, dans certaines circonstances, les limites d'élasticité du verre sont dépassées, la bouteille doit conserver une partie du gonflement éprouvé et ne doit pas reprendre sa capacité primitive.

Voici comment M. Salleron l'a démontré : au col d'une bouteille on adapte un tube *ab* (*fig.* 8) de faible diamètre, divisé en centièmes de centimètre cube et constituant un prolongement très étroit du col de la bouteille.

Ce tube permettra de mesurer exactement, par la diminution du volume de liquide dont la bouteille et l'ajutage sont remplis, les changements de capacité qui peuvent se produire.

La partie supérieure *a* du tube gradué est mise en communication à l'aide du tube de raccord *t* avec une

petite pompe foulante P qui comprime de l'air au-dessus de l'eau qui remplit la bouteille. Un manomètre M mesure à chaque instant la pression à laquelle la bouteille est soumise. Enfin, cette dernière est immergée au sein d'un bain-marie B, qui est maintenu à une température invariable par un thermorégulateur R.

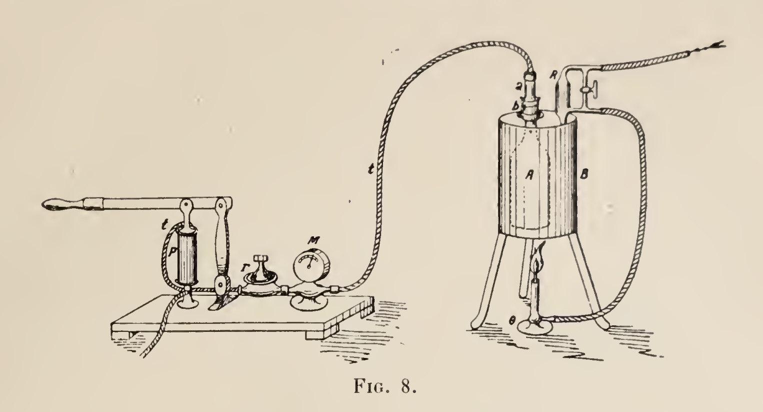


Fig. 8.

Pour une bouteille du poids de 985 grammes et d'une capacité de 825 centimètres cubes, maintenue dans le bain-marie à une température de 10° et soumise graduellement à une pression de 10 atmosphères, l'augmentation de volume a été de $0^{cc},600$.

Pour 13 atmosphères, l'augmentation a été de $0^{cc},800$; et pour 14 atmosphères, $0^{cc},900$.

Cette bouteille, qui a ainsi augmenté de volume permanent, a subi dans sa constitution une modification profonde qui doit nécessairement nuire à sa résistance. Quand, à un moment donné, les molécules sont parvenues à la limite d'écartement qui correspond à la largeur d'un de leurs côtés, ou l'ont plus ou moins dépassée, le verre se rompt dans certaines régions internes; si l'effort persiste, les lésions s'agrandissent, se propagent jusqu'à ce que le verre se détache en morceaux.

En examinant à la loupe des fragments de bouteilles cassées, on voit très souvent des « esquilles », des fissures produites par ce changement d'état permanent du verre.

Les bouteilles qui ont été forcées par un effort trop considérable perdent de leur solidité et se rompent sous un effort très faible.

La composition chimique du verre est l'élément qui joue le rôle le plus important quant à la résistance que présenteront les bouteilles. Cependant, on a reconnu que cette composition peut varier dans des limites assez notables, sans que les produits fabriqués cessent d'avoir l'élasticité nécessaire pour résister aux pressions n'excédant jamais 10 atmosphères.

La conclusion à tirer de ces constatations, c'est que le verrier ne doit pas tant chercher à fabriquer des bouteilles qui ne se cassent que sous une pression exagérée que des bouteilles qui, sous la pression normale d'un tirage régulier, ne changent pas de capacité permanente.

Dans l'essai des bouteilles, on devra rester dans le même esprit et se contenter de les soumettre à une pression de 10 atmosphères, qui n'amènera de changement permanent du volume que pour les bouteilles réellement défectueuses, alors que, si on opérait sous 30 atmosphères, on verrait se produire ce résultat, en apparence paradoxal, que telle bouteille qui aurait victorieusement supporté cette épreuve pourrait, plus facilement qu'une autre — en réalité moins résistante — se briser à la longue, sous l'action d'une pression de 8 à 10 atmosphères.

6. — Porosité du verre. — MM. E. Warburg et F. Tegetmeier ont fait plusieurs expériences intéressantes

pour montrer que le verre, dans certaines conditions, est plus poreux qu'on ne l'a cru jusqu'à présent. Le professeur W. Chandler Roberto-Austen décrit ces expériences en signalant qu'elles démontrent la possibilité de produire à l'occasion, dans les corps vitreux, une porosité susceptible de donner passage à des éléments ayant relativement de faibles volumes atomiques ; tandis que d'autres éléments, ayant des volumes atomiques plus considérables, sont retenus et séparés ; il se produit ainsi un tamisage mécanique des éléments.

Un récipient avait été divisé en deux compartiments par une feuille de verre qui pouvait avoir plusieurs millimètres d'épaisseur. Un amalgame de sodium fut placé d'un côté du verre et du mercure pur de l'autre côté ; le tout fut ensuite chauffé jusqu'à la température modérée de 200° C., à laquelle le verre devient légèrement conducteur.

On mit alors les fils positif et négatif d'une batterie Ranti en communication respective avec le contenu des deux compartiments, et l'on trouva, au bout de trente heures, qu'une quantité considérable de sodium était passée dans le mercure à travers le verre, qui, cependant, avait conservé son poids et sa transparence primitifs. D'autre part, tout le monde connaît les phénomènes de sudation qui se produisent dans les récipients en verre contenant certains liquides et en particulier les essences minérales ; le pétrole destiné à l'éclairage est dans ce cas ; il n'est pas une ménagère qui n'ait à le constater journellement.

Cet effet attribué pendant longtemps à un phénomène de capillarité est réellement dû à cette propriété de porosité que possède le verre.

§ 2. — Agents chimiques

7. — Action de certains gaz réducteurs. — Nous dirons d'abord un mot de l'action sur le verre, *à chaud*, de certains corps qui, comme le carbone, l'hydrogène, ne peuvent agir par incorporation.

On a constaté que les agents réducteurs ont la curieuse propriété de changer la coloration du verre, agissant ainsi de façon analogue à la lumière, avec cette seule différence que l'action est beaucoup plus rapide.

Pelouze a reconnu que les métalloïdes : carbone, soufre, sélénium, phosphore, hydrogène, ont une action absolument identique et donnent aux verres blancs du commerce une coloration jaune très prononcée.

Après avoir remarqué, d'une part, que le verre chimiquement pur, exempt de sulfate et d'oxyde de fer, n'est pas influencé par les réducteurs, et, d'autre part, que tous les verres du commerce contiennent en plus ou moins forte proportion, et sous forme d'impuretés, à la fois des sulfates et de l'oxyde de fer, Pelouze est arrivé à conclure que la couleur que prend le verre sous l'influence des métalloïdes est due à une seule et même cause : la réduction du sulfate en sulfure et du peroxyde de fer en protoxyde de fer.

En ce qui concerne le cristal, on sait avec quelle facilité il est coloré en noir par les gaz réducteurs, par suite de la réduction de l'oxyde de plomb et de sa transformation en plomb métallique.

Si, en effet, on expose pendant quelques minutes, dans la flamme du chalumeau, un fragment de verre plombeux, on trouve, après refroidissement, que la surface

est recouverte d'un enduit brillant à reflet métallique.

On a utilisé l'action colorante des réducteurs à la fabrication de certains verres colorés qu'on désigne sous le nom de verres colorés par cémentation.

Si dans une enveloppe absolument close on place des feuilles de verre ordinaire blanc, du commerce, entre lesquelles on interpose une couche de charbon de bois, et qu'ensuite on porte le tout à la température du rouge sombre, et qu'on laisse refroidir lentement, on obtiendra, suivant la durée de l'opération, ou bien du verre jaune dans toute la masse, ou bien des feuilles de verre dont les surfaces seront colorées sur une épaisseur plus ou moins grande, laissant au centre une lame de verre blanc.

Cette action réductrice des métalloïdes sur le verre, que Pelouze a mise si nettement en évidence et à laquelle il a donné sa véritable explication, était connue des verriers du siècle dernier, ainsi qu'on peut le voir par le passage suivant tiré d'un ouvrage sur la verrerie en date de 1752, et ayant pour titre : *Manière de donner au cristal de roche sans le fondre une couleur de vipère.*

Ce passage est ainsi conçu :

« On prend des morceaux de cristal de roche de différentes grandeurs, on choisit ceux qui sont bien purs et sans aucun défaut, on y joint de l'antimoine et de l'orpiment bien pulvérisés de chacun deux onces, et de sel ammoniac une once ; l'on met ces matières pulvérisées au fond d'un creuset, et l'on arrange par dessus les morceaux de cristal dont on vient de parler. L'on couvre le creuset d'un autre creuset renversé de façon que l'ouverture de l'un soit appliquée à l'ouverture de l'autre ; on les lute bien ; après que le lut est séché, on met le tout au milieu de charbons qu'on laisse allumer petit à petit, et d'eux-mêmes.

« Le creuset, en commençant à sentir l'action du feu, fumera considérablement; il faut pour cette opération une cheminée fort large; lorsque la fumée s'élèvera, le parti le plus sûr sera de sortir du laboratoire, car cette vapeur est mortelle. Lorsqu'il ne viendra plus de fumée, on laissera le feu s'éteindre de lui-même et le creuset se refroidir; on en ôtera pour lors les morceaux de cristal. Ceux qui seront à la surface du creuset seront de couleur d'or de rubis balais et marqués de différentes couleurs ; ceux qui seront au fond seront pour la plupart de couleur de vipère ou truités; on pourra polir à la roue et brillanter ces cristaux comme on fait d'autres pierres précieuses. Les autres morceaux de cristal seront fort beaux et feront un bel effet à la vue. Cette opération n'étant ni longue ni coûteuse, on pourra en colorer une bonne quantité : il se trouvera toujours sur le grand nombre quelques morceaux d'une singulière beauté. »

8. — Action de l'air. Irisation. — L'air est par lui-même absolument sans action sur le verre. Les altérations qui se manifestent sur les objets en verre exposés à l'air sont dues, ainsi que nous le verrons plus loin, à la vapeur d'eau et à l'acide carbonique que contient l'air atmosphérique.

Nous dirons, en passant, un mot du phénomène que l'on observe sur les verres anciens enfouis, et auquel on a donné le nom d'irisation.

En examinant des verres anciens décomposés partiellement, on remarque à la surface une substance de nature spéciale, qui se sépare en écailles et dont la composition est différente de celle du verre dont elle provient.

La teneur en silice y est très considérable, tandis qu'on n'y rencontre que très peu d'alcalis.

Frémy et Clémandot ont réussi à reproduire d'une manière régulière et à rendre adhérente au verre cette irisation qui lui donne l'aspect de la perle ou de la nacre.

L'opération consiste à soumettre le verre, sous l'influence de la chaleur et de la pression, à l'action de l'eau contenant environ 15 0/0 d'acide chlorhydrique.

Certaines espèces de verre ne se prêtent pas à l'irisation; d'autre part, les conditions du recuit et de la trempe exercent une influence notable sur la production du phénomène.

On peut encore obtenir l'irisation par un autre procédé que nous décrirons sommairement.

On a à sa disposition deux moufles; dans le premier, on chauffe faiblement les objets à iriser et, quand ils ont atteint la température du rouge sombre, on les introduit dans le second moufle, qui, lui, a été porté à une température très élevée et sur la sole duquel on projette de la poudre d'iris (sel d'étain) jusqu'à ce que l'intérieur du moufle s'emplisse de vapeurs.

Pendant ce temps, le moufle reste ouvert; on le ferme ensuite et on laisse les objets se refroidir lentement. Si la manipulation est bien faite, l'irisation se produit vivement et de façon régulière.

9. — Action de l'eau. — Mises en contact avec de l'eau froide, les surfaces vitreuses ne sont altérées qu'avec une extrême lenteur. Si l'eau est bouillante, l'action est plus rapide et déjà telle qu'il faut s'en préoccuper et en tenir compte dans les recherches chimiques très précises, qui sont exécutées à l'aide de fioles ou vases en verre.

L'expérience a démontré en effet que l'évaporation, à

la température d'ébullition, d'un litre d'eau distillée, dans un vase en verre de Bohême, amène une perte de poids de 14 milligrammes.

Si, au lieu d'agir sur une surface vitreuse, l'eau exerce son action sur de la poudre de verre, on observe une altération très rapide.

Nous indiquerons ici les résultats que nous avons obtenus en opérant, dans ces conditions, sur des verres de composition chimique différente.

Voici comment l'opération a été conduite dans les trois essais que nous avons faits :

Le verre a été porphyrisé autant qu'il a été possible de le faire, puis 5 grammes de chacun des échantillons ont été soumis dans une capsule de platine à l'action d'un litre d'eau distillée dont la température a été constamment maintenue très voisine de 100°. Naturellement cette eau distillée a été essayée et reconnue ne contenir que des traces de matières minérales.

Toute l'eau n'a pas été mise d'un seul coup en contact avec le verre; on l'introduisait dans la capsule par fractions de 100 centimètres cubes.

On a arrêté l'évaporation quand le volume d'un litre s'est trouvé réduit à 50 centimètres cubes, et on a réglé le feu de manière à obtenir ce résultat en huit heures.

A ce moment on filtrait pour séparer le verre de la partie dissoute. Cette filtration est difficile à mener à bonne fin, car le verre finement porphyrisé traverse facilement les filtres. On n'arrive à s'en débarrasser complètement que par plusieurs filtrations successives.

La liqueur clarifiée était évaporée à sec, et le résidu pesé, après calcination au rouge sombre. Le poids trouvé ne doit pas être considéré comme entièrement composé par les substances enlevées au verre; il existe en effet

dans le résidu une notable proportion d'acide carbonique (sous forme de carbonates alcalins) dont on ne peut admettre la préexistence dans le verre, du moins dans ceux dont il est question ici, et qui étaient tous trois fabriqués au sulfate.

La présence du carbonate alcalin est due à l'action de l'acide carbonique de l'air sur le silicate alcalin dissous par l'eau; ceci est confirmé par la présence de silice gélatineuse dans le produit des évaporations. A mesure que les liqueurs se concentrent, on voit se former des flocons de silice qui restent sur le filtre et n'entrent pas, par suite, dans le résidu final.

On voit donc qu'il est difficile, sinon impossible, de déterminer exactement le poids de la silice dissoute; mais ceci n'infirme en rien les résultats, puisqu'on peut connaître exactement la quantité totale d'alcalis qui a été enlevée par l'eau, et que nous donnons ci-dessous en la rapportant à 100 grammes de verre.

	I	II	III
Silice	66,850	69,90	69,60
Chaux	12,850	11,10	16,10
Peroxyde de fer et alumine	1,600	1,20	1,10
Magnésie	Traces	Traces	Traces
Soude	18,700	17,80	13,20
	100,000	100,00	100,00
Soude enlevée par l'eau à 100 gr. de verre	3,974	2,076	0,986
Alumine, fer, chaux enlevés par l'eau à 100 gr. de verre	Traces	Traces	Traces

Nous avons cherché à déterminer la composition du silicate de soude enlevé par l'eau au verre, et nous avons

trouvé, après dosage de la silice gélatineuse, que ce silicate a pour formule : $SiO^3 3NaO$.

Tous les verres, quels qu'ils soient, réduits en poudre fine et abandonnés au contact de l'air, se décomposent lentement en absorbant de l'eau et de l'acide carbonique. Cette absorption d'acide carbonique est parfois si considérable que, si l'on fait agir un acide sur le verre ainsi abandonné à lui-même pendant quelques jours, on croirait opérer sur de la craie.

L'eau chaude sous pression a une action tellement énergique sur le verre qu'elle élimine totalement les bases alcalines.

C'est ainsi que M. Daubrée, en chauffant dans l'eau sous pression à 300° des tubes en verre, les a décomposés et a obtenu une matière fibreuse ayant la composition de la wollastonite (bisilicate de chaux).

10. — Action des solutions salines sur le verre. — La plupart des solutions salines neutres n'agissent sur le verre que par l'eau qui les constitue. Il n'en est plus de même des solutions alcalines ou acides ; les premières surtout ont une action corrosive très marquée, elles dissolvent toutes les parties constituantes du verre.

La soude est, de tous les alcalis caustiques, celui dont l'action dissolvante est le plus énergique ; après elle vient la lessive potassique, puis l'ammoniaque, et enfin l'eau de baryte.

Les solutions alcalines caustiques très concentrées, agissant à la température ordinaire, attaquent moins le verre que les solutions diluées; pour chacune d'elles en particulier l'attaque est d'autant plus énergique que la température est plus élevée. Il est à remarquer que les

solutions rendues impures par de faibles quantités de silice semblent avoir plus d'action.

Les carbonates alcalins dissous attaquent plus fortement le verre que l'eau, même en solutions très concentrées. Le carbonate de soude est plus corrosif que le carbonate de potasse.

Une solution chaude de sulfate de chaux décompose très rapidement le verre en donnant naissance à du sulfate de soude. D'une manière générale, on a reconnu que les sels les plus actifs sont ceux dont l'acide forme avec la chaux des sels insolubles.

Cette action des solutions salines a été étudiée avec le plus grand soin, car elle présente le plus haut intérêt pour la fabrication des récipients en verre, des bouteilles, etc.

Les boissons, vin et cidre, ne sont en effet autre chose que des dissolutions étendues, il est vrai, mais cependant encore assez chargées de sels divers parmi lesquels dominent les sels de potasse : sulfates, tartrates, etc., dont l'action sur le verre est notable.

11. — Action des acides sur le verre. — L'acide sulfurique attaque à peu près tous les silicates simples; aussi son action est-elle très marquée sur le verre réduit en poudre; les acides chlorhydrique et azotique agissent avec une énergie beaucoup moindre.

Par contre, l'acide fluorhydrique jouit de la propriété de décomposer très rapidement et totalement le verre avec élimination de la silice. Il en est de même du fluorhydrate d'ammoniaque et des fluorhydrates de fluorures alcalins qui, sous l'action de la chaleur, dégagent de l'acide fluorhydrique.

12. — Gravure sur verre. — On a utilisé cette propriété pour graver les divisions sur les tiges des thermomètres, sur les burettes et pipettes graduées, pour graver les pierres dures, les poteries, les émaux, etc.

L'acide fluorhydrique gazeux donne des traits mats; l'acide liquide, au contraire, ou les fluorhydrates de fluorures ne donnent qu'une gravure transparente ou à peine opaque, ce qui est dû à la dissolution, dans le bain, des fluorures de calcium ou de plomb qui se forment. Cependant, si la liqueur d'acide fluorhydrique est très concentrée, on obtient en quelques instants une gravure mate; mais ces mats ne sont pas solides et sont altérés par l'état hygrométrique de l'air; l'humidité fait disparaître momentanément l'effet du mat.

Le bain d'acide pour gravure transparente est généralement composé de :

Fluorhydrate de fluorure de potassium...	500 grammes
Acide chlorhydrique	250 —
Eau	1 litre

Si à cette liqueur on ajoute l'un des sels : sulfate de potasse ou oxalate de potasse, sulfate d'ammoniaque ou sulfate de zinc, en quantité suffisante pour la saturer, on obtient une gravure mate très résistante.

On peut obtenir le même résultat en faisant usage d'une dissolution d'acide fluorhydrique saturée par des cristaux de soude.

Gravure transparente sur verre mat. — Ce mode de gravure est d'origine anglaise. Sur la glace à graver, on étend une couche de vernis ; puis, à l'aide d'une pointe, on trace le dessin à reproduire, on fait autour de l'objet un rebord avec un mélange de poix, de résine et de cire afin

de retenir la solution faible d'acide fluorhydrique que l'on verse sur l'objet.

Après attaque, on lave la glace et on la dépolit par frottement à l'aide d'une autre glace et de sable fin.

Les endroits non attaqués par l'acide sont seuls dépolis, et le dessin ressort ainsi en transparent.

On a remplacé ce mode d'opérer par la gravure faite directement sur verre dépoli.

M. Kessler arrive au même résultat de la façon suivante :

On imprime sur papier le dessin à reproduire en faisant usage d'une encre composée de :

Bitume de Judée.........	3 parties
Stéarine.................	2 —
Essence de térébenthine..	3 —

On décalque ensuite sur l'objet à graver, puis on plonge celui-ci dans un bain d'acide fluorhydrique, et après lavage, on enlève la réserve à l'aide d'une lessive alcaline ou au moyen d'essence.

Pendant la gravure, il se forme du fluosilicate avec le verre et du fluorure de plomb avec le cristal. Pour empêcher ces composés de s'attacher à la surface vitreuse et de rendre la gravure mate et inégale, on imprime à l'objet placé dans le bain un mouvement de rotation.

M. Kessler a composé une encre à base de fluorhydrate d'ammoniaque, qui permet d'écrire en mat sur le verre, puis une autre encre de même nature, mais acidifiée par l'acide acétique, pour écrire sur le cristal.

Gravure au moyen d'un jet de sable. — La gravure à l'acide est un procédé très dispendieux, auquel on a dû renoncer dans les applications industrielles du verre gravé.

On a alors recours à la corrosion que subit le verre sous l'action d'un jet de sable. Ce procédé est dû à M. Tilghman, de Philadelphie. Dans ce mode d'opérer, on recouvre les parties à réserver à l'aide d'un patron en papier, en cuivre ou en laiton très mince, et l'on projette à la surface du verre un jet de sable lancé violemment. Avec la pression du soufflet d'émailleur on peut, en quelques minutes, dépolir une plaque de verre de 2 à 3 mètres carrés.

13. — Verre givré. — C'est également par une action mécanique que M. Bay a réussi à reproduire les dessins fantaisistes dénommés « fleurs de glace » qui sont tracés par la gelée sur les vitres des appartements.

La préparation de ce verre est des plus simples. On enduit la surface du verre, préalablement dépoli au sable, d'une matière spéciale formant vernis, qui pénètre dans les cavités du verre dépoli.

Les feuilles de verre ainsi enduites sont mises dans une étuve ou simplement au soleil.

L'enduit en se contractant se réduit en petites écailles qui enlèvent avec elles une très légère partie de la surface du verre. Ces cassures, se produisant dans tous les sens, forment un ensemble rappelant exactement l'effet du verre givré par le froid, effet qu'on peut accentuer en renouvelant l'opération un plus ou moins grand nombre de fois.

Le même procédé peut être appliqué aux verres colorés dans leur masse ou superficiellement ; on obtient ainsi des demi-teintes d'un gracieux effet.

En argentant ou dorant les verres givrés sur la face opposée, on donne au verre l'apparence d'émaux qu'on peut employer à la décoration des plafonds, des frises d'encadrement, des chambranles, des cadres de glaces, etc.

14. — Verre craquelé. — On peut obtenir plus facilement des verres ayant l'apparence des verres givrés, en produisant sur le verre, au moment même de sa fabrication, des craquelures plus ou moins profondes.

Pour cela, le verre qui vient d'être cueilli à la canne est plongé brusquement dans l'eau froide dont le contact produit à la surface de la « paraison » des craquelures, des brisures suivant toutes les directions. On souffle aussitôt la pièce et on travaille ensuite comme à l'ordinaire. Les craquelures s'agrandissent et ne se referment pas, si l'on prend la précaution de ne réchauffer l'objet que juste ce qui est nécessaire pour l'achèvement du travail.

§ 3. — Analyse des verres

15. — Procédé Henri Sainte-Claire Deville. — Ce procédé s'appuie sur ce fait qu'un silicate quelconque devient attaquable par les acides quand il contient un excès de silicate de chaux.

Le verre à analyser doit être mélangé avec une quantité de carbonate de chaux telle que l'oxygène des bases soit dans un certain rapport avec l'oxygène de la silice. Ceci implique nécessairement qu'on connaisse à peu près à l'avance la teneur en silice, ce qui est généralement le cas. Dans l'incertitude, il vaut mieux mettre plus de chaux que moins; cependant il ne faudrait pas en exagérer trop la dose, car on s'exposerait à chasser, par volatilisation, une partie notable des alcalis : potasse ou soude.

La pratique indique que, pour le verre à bouteilles, il convient d'ajouter 10 à 20 0/0 de carbonate de chaux ;

pour le verre à vitres ou à glaces, 30 à 40 0/0. Pour la silice pure il faudrait en ajouter 110 à 120 0/0.

Le carbonate de chaux doit, naturellement, être chimiquement pur. On le prépare par précipitation, au moyen du carbonate d'ammoniaque, d'une dissolution de marbre blanc dans l'acide azotique.

On porphyrise le verre à analyser, on le dessèche à la lampe à alcool et on le mélange avec la quantité convenable de carbonate de chaux. On introduit le mélange dans un creuset de platine, on pèse le creuset et son contenu, puis on chauffe au rouge blanc pendant quinze à vingt minutes dans un petit four en magnésie comprimée et à l'aide du chalumeau à gaz et air de M. Schlœsing.

On retire le couvercle et on examine la matière, qui doit être parfaitement fondue et présenter une surface lisse, si l'opération est bien faite. Tout le carbonate de chaux est alors décomposé et la chaux transformée en silicate basique.

On pèse à nouveau ; la perte de poids doit être précisément égale au poids d'acide carbonique contenu dans le carbonate de chaux. S'il en est ainsi, on est certain de n'avoir pas mis trop de chaux et on est assuré qu'il ne s'est pas volatilisé d'alcalis.

On laisse alors refroidir et on détache avec soin la matière du creuset. On peut d'ailleurs, sans inconvénient, n'en prendre qu'une partie pour l'analyse. On la réduit en poudre dans un mortier d'agate et on introduit un poids déterminé de cette matière dans une capsule de platine.

On ajoute de l'acide azotique et on chauffe légèrement; le verre est attaqué, et la silice mise en liberté; on pousse alors l'évaporation à sec jusqu'à ce qu'il ne se dégage plus d'acide azotique et qu'il commence à se produire des

vapeurs rutilantes. La silice est ainsi rendue insoluble, les nitrates de fer, d'alumine et de manganèse décomposés et transformés en oxydes insolubles; de même la magnésie passe à l'état de sous-nitrate insoluble.

On arrose la masse avec du nitrate d'ammoniaque, qui reforme le nitrate de magnésie et dissout les nitrates alcalins ainsi que le nitrate de chaux. On chauffe jusqu'à ce que toute odeur d'ammoniaque ait disparu. On décante alors sur un filtre et on continue les lavages dans la capsule jusqu'à ce que la liqueur filtrée ne laisse plus de résidu par son évaporation sur une lame de platine.

On se trouve avoir ainsi divisé l'analyse en deux parties : d'une part, dans la capsule et sur le filtre, les matières insolubles dans le nitrate d'ammoniaque qui sont la silice, l'alumine, l'oxyde de fer et le manganèse; d'autre part, dans la liqueur, la chaux et les alcalis à l'état de nitrates.

Occupons-nous d'abord de la partie insoluble. Les matières de la capsule sont mises en digestion avec de l'acide nitrique qui dissout l'alumine et le peroxyde de fer, laissant insolubles la silice et la majeure partie du manganèse; la présence de ce métal est décelée par la coloration noire qu'il communique à la silice. S'il n'y a pas de manganèse, il n'y a qu'à peser la silice après calcination.

S'il y a du manganèse, on lave la silice avec de l'acide sulfurique étendu et additionné d'un cristal d'acide oxalique.

Le manganèse est dissous, on évapore sa solution et on le pèse en sulfate après légère calcination.

La liqueur azotique, contenant l'alumine, l'oxyde de fer et des traces de manganèse, est évaporée à sec, puis le résidu pesé après calcination.

Ce résidu est ensuite placé dans une nacelle de platine, et le tout disposé dans un tube de platine mis en relation, à l'une de ses extrémités, avec un producteur de gaz, à l'autre avec un petit ballon contenant de l'eau distillée destinée à condenser les vapeurs. Après avoir porté au rouge le tube de platine, on y fait passer un courant d'hydrogène qui réduit le peroxyde de fer et l'oxyde de manganèse. On remplace ensuite le courant d'hydrogène par un courant d'acide chlorhydrique gazeux qui transforme en chlorures volatils le fer et le manganèse. On termine par un courant de vapeur d'eau qui enlève les chlorures de fer et de manganèse, qu'on séparera ensuite.

On retire la nacelle, qui ne contient plus que l'alumine, dont on prend le poids.

On évapore à sec, après y avoir ajouté quelques gouttes d'acide sulfurique, l'eau du ballon dans lequel on a opéré la condensation des chlorures de fer et de manganèse ; on calcine doucement et on prend le poids du résidu, qui est composé de peroxyde de fer et de sulfate de manganèse.

Ce dernier est ensuite enlevé à l'eau chaude et pesé en sulfate après évaporation à sec. On prend également le poids de l'oxyde de fer.

Revenons à la liqueur contenant les nitrates. On y précipite la chaux par l'oxalate d'ammoniaque, et on pèse à l'état de chaux caustique après forte calcination.

Du poids trouvé on retranche le poids de chaux correspondant au carbonate ajouté et on a la teneur en chaux de la substance analysée.

La liqueur filtrée est évaporée à sec dans une capsule de platine après addition d'un mélange d'acide chlorhydrique et d'acide azotique. On chauffe jusqu'à consistance

sirupeuse, puis on ajoute de l'acide oxalique concentré, qui est décomposé par les nitrates, lesquels se transforment en carbonates. On reprend par l'eau qui dissout les carbonates alcalins. Le carbonate de magnésie est calciné et pesé à l'état de magnésie ou de sulfate de magnésie.

Il ne reste plus que les alcalis ; on concentre leur solution et on ajoute de l'acide perchlorique, qui forme avec la potasse un sel peu soluble dans l'eau et tout à fait insoluble dans l'alcool à 36°. Dans la solution filtrée, il reste la soude, qu'on pèse en chlorure de sodium après évaporation et calcination à basse température.

Cette méthode est très rigoureuse, mais elle est d'une application délicate et a en outre l'inconvénient d'exiger un temps considérable pour son exécution.

D'autre part, dans les analyses de verres contenant du sulfate — ce qui est généralement le cas — elle ne permet pas de doser directement l'acide sulfurique.

Aussi généralement la remplace-t-on par la suivante, beaucoup plus rapide, qui donne néanmoins des résultats très satisfaisants.

16. — Méthode industrielle. — On attaque un gramme de verre, préalablement porphyrisé, par cinq fois son poids de carbonate de soude, dans un creuset de platine qu'on porte progressivement au rouge vif. On le maintient à cette température pendant une demi-heure, puis on le laisse refroidir. La masse fondue est alors placée dans une capsule de porcelaine et mise en digestion dans 150 centimètres cubes d'eau distillée, puis on acidifie par l'acide chlorhydrique et on évapore à sec pour rendre la silice insoluble. On reprend ensuite par de l'eau additionnée d'acide chlorhydrique et on chauffe

doucement pour favoriser la transformation de l'oxyde de fer en chlorure.

On recueille ensuite la silice sur un petit filtre sans plis, on la sèche, puis on en prend le poids après forte calcination.

La liqueur, séparée de la silice, est traitée par un léger excès d'ammoniaque qui précipite le peroxyde de fer et l'alumine. Après départ complet de l'ammoniaque au bain de sable, on recueille sur un filtre l'alumine et l'oxyde de fer, dont on détermine le poids, après calcination.

Ce mélange est introduit dans un petit ballon et traité par de l'acide chlorhydrique additionné de quelques gouttes d'acide sulfurique. Quand la dissolution est complète, on ramène le sel de fer au minimum au moyen de zinc pur ; puis, dans la liqueur refroidie, on dose le fer par le permanganate de potasse. De ce poids de fer on déduit la teneur en alumine.

La liqueur d'où on a séparé l'alumine et l'oxyde de fer est portée à l'ébullition et additionnée d'oxalate d'ammoniaque, qui précipite la chaux, qu'on filtre, calcine et pèse à l'état de chaux caustique. La magnésie est précipitée à l'état de phosphate ammoniaco-magnésien, au moyen du phosphate de soude. La calcination du phosphate ammoniaco-magnésien donne pour résidu du pyrophosphate de magnésie contenant dans cent parties 36,036 de magnésie.

Dosage des alcalis. — Un gramme de verre finement broyé est mélangé intimement à 8 grammes de fluorhydrate d'ammoniaque, et le tout est desséché lentement jusqu'à départ complet des vapeurs de fluorhydrate. On renouvelle ce traitement une deuxième fois pour être

assuré d'une attaque complète. On calcine alors doucement au rouge sombre et, après refroidissement, on ajoute quelques gouttes d'acide sulfurique concentré, qui décompose les fluorures et transforme toutes les bases en bisulfates. On dessèche avec précaution, puis on calcine au rouge sombre pour décomposer les bisulfates.

On reprend ensuite par l'eau, et on ajoute, sans filtrer, 2 grammes d'hydrate de baryte en poudre. On porte à l'ébullition pendant une demi-heure, puis on filtre pour séparer le sulfate de baryte, ainsi que l'alumine et l'oxyde de fer, qui ont été précipités grâce à l'excès de baryte.

La liqueur filtrée contient, outre les alcalis à doser, l'excès de baryte, la chaux et la magnésie. On y fait passer un courant d'acide carbonique, qui donne des carbonates de toutes ces bases ; on fait bouillir pendant dix minutes pour chasser l'excès d'acide carbonique, puis on filtre. La liqueur filtrée, additionnée d'acide chlorhydrique, est évaporée à sec, puis reprise par l'eau. On ajoute une pincée de carbonate d'ammoniaque, qui complète la précipitation des traces de baryte, de chaux et de magnésie ; on chauffe légèrement et on filtre.

La liqueur filtrée, qui ne contient plus que les chlorures alcalins, est évaporée à sec, puis on calcine au rouge sombre pour chasser le chlorhydrate d'ammoniaque. Dans le mélange des chlorures alcalins pesés, on sépare la potasse par le bichlorure de platine et on dose généralement la soude par différence.

Dosage du sulfate de soude libre contenu dans le verre. — Dans tous les verres fabriqués au sulfate on retrouve à l'état d'impureté une quantité plus ou moins considérable de sulfate de soude, qui n'a pas été décomposé pendant la fusion.

Son dosage pourrait être exécuté sur la prise d'essai, qui a servi au dosage de la silice, de l'alumine, etc. ; mais, généralement, il est préférable, afin d'avoir des résultats plus précis, d'opérer sur 5 grammes de verre, qu'on attaque par le carbonate de soude. Après avoir séparé la silice, on dose l'acide sulfurique en le précipitant par le chlorure de baryum.

17. — Analyse des verres plombeux. — L'analyse des verres dans lesquels la chaux est remplacée partiellement ou en totalité par de l'oxyde de plomb s'effectue à peu près comme nous venons de l'indiquer. Cependant, en raison de l'action énergique que le plomb exerce sur le platine, on se voit dans l'obligation de remplacer le creuset de platine par un creuset de porcelaine.

Le produit de l'attaque au carbonate de soude est dissous dans l'acide azotique, puis évaporé à sec. Dans la liqueur filtrée, après séparation de la silice, on dose le plomb à l'état de sulfate.

Dans les conditions de l'attaque, le dosage de la silice et de la chaux ne peut être exact ; les résultats peuvent être trop élevés de 1 0/0 environ.

S'il s'agit de faire ce dosage très exactement, on opère la désagrégation dans de petits creusets en fer doux, qui résistent parfaitement à l'action des alcalis carbonatés fondus.

Étant donnés les résultats de l'analyse d'un verre, il est très facile d'en retrouver la composition, c'est-à-dire le mélange des matières premières qui ont été employées pour sa fabrication.

Au poids d'alcalis donné par l'analyse on ajoute 1 à 2 0/0, afin de tenir compte de la perte qui se produit par

volatilisation pendant la fusion du verre, et on calcule en carbonate ou en sulfate.

On ne tiendra pas compte de l'alumine ni de l'oxyde de fer, car le plus généralement ces substances proviennent des matières premières, sable, calcaires et sel de soude, et aussi de l'argile des creusets.

CHAPITRE II

PRODUITS RÉFRACTAIRES
FOURS DE VERRERIE ET COMBUSTIBLES

§ 1. — Poterie. — Produits réfractaires

18. — Produits réfractaires. — La fabrication du verre est intimement liée à celle des produits réfractaires, dont on peut même dire qu'elle est absolument dépendante. Aussi entrerons-nous dans quelques détails sur la préparation des matériaux employés à la construction des fours et sur la fabrication des pots de verrerie.

Le verrier attache avec raison une importance capitale à cette préparation, car la fabrication proprement dite du verre repose absolument sur la qualité des produits réfractaires. Quels que soient, en effet, les soins et la vigilance qu'apporte le verrier à sa fabrication, si la poterie périclite, tout est compromis.

Pour ce motif, la plupart des verriers travaillent eux-mêmes leurs produits réfractaires et font de cette préparation une annexe de leur fabrication. Ils peuvent de la sorte, en toute connaissance de cause, apporter à ce travail les modifications que l'expérience leur aura fait reconnaître utiles et nécessaires.

Les qualités qu'on exige des produits réfractaires sont de différents ordres. Outre la condition essentielle qu'ils doivent tous remplir, à savoir la résistance au feu, les uns doivent pouvoir sans se briser subir des variations brusques de température, les autres doivent être inattaquables par les matières en fusion.

L'idéal serait que ces trois qualités pussent être réunies, mais malheureusement elles paraissent incompatibles ; aussi le verrier doit-il chercher à combiner les mélanges destinés à la fabrication des produits réfractaires, de manière à leur faire tenir un juste milieu ou, suivant le cas, à leur donner, parmi les trois qualités ci-dessus indiquées, la dominante répondant à un besoin déterminé.

D'une façon générale, nous dirons qu'on rendra les produits réfractaires d'autant plus résistants aux brusques changements de température qu'ils seront plus poreux ; et que, d'autre part, ils seront d'autant moins attaquables qu'ils seront plus compacts. Nous ajouterons qu'à composition chimique égale les produits poreux ou à gros grains seront plus réfractaires que les produits denses.

Les recherches du verrier sont rendues très délicates et le plus souvent ne peuvent lui rendre que des services momentanés, car la base de sa poterie, l'argile, est une substance dont la composition et, par suite, les propriétés sont sujettes à des variations incessantes. Ces variations s'expliquent par la nature différente des roches susceptibles d'éprouver l'altération qui les amène à l'état d'argile, par la décomposition plus ou moins complète que présentent les roches au moment du transport gédogique, et par la manière dont s'est effectué le dépôt des matériaux.

Les argiles pures sont constituées par le mélange d'un ou plusieurs silicates d'alumine, avec une quantité plus

ou moins considérable de sable quartzeux de grosseur variable.

La quantité de sable peut varier pour une même argile dans des limites très étendues : depuis 10 0/0 jusqu'à 40 et même 50 0/0. Quant à sa grosseur, elle est également très variable ; c'est ainsi que, dans le même gisement, on trouve du sable dont la grosseur est comprise entre un demi-millimètre et 1/20 de millimètre.

Telle qu'on l'emploie en poterie, l'argile renferme, outre les silicates d'alumine et le sable, des impuretés dont elle a été souillée dans le transport au moment de sa formation : oxyde de fer, carbonates de chaux et de magnésie, gypse, pyrites, matières bitumineuses, etc.

Ces diverses substances ont pour propriété d'ajouter à la fusibilité de l'argile et d'apporter un trouble dans ses qualités plastiques ; aussi leur dosage est-il de première nécessité.

La recherche et le dosage du sable quartzeux ou silice libre présentent également le plus haut intérêt, de même que la détermination de la grosseur de ce sable, par suite des modifications qu'il apporte dans la manière de se comporter de l'argile, aussi bien comme résistance au feu que comme plasticité.

L'analyse des argiles comprendra donc deux parties distinctes : une analyse chimique et une analyse spéciale ayant pour objet la détermination et la classification du sable libre.

19. — Analyse chimique des argiles. — La méthode généralement suivie est celle dont nous avons parlé plus haut à propos du verre. Elle consiste à attaquer l'argile par le carbonate de soude.

Nous ne la décrirons pas de nouveau, nous nous con-

tenterons d'indiquer que généralement, surtout dans le cas d'argiles très alumineuses, il est bon de procéder à une double attaque de la silice. Cette dernière retient en effet, presque toujours, une certaine quantité d'argile qui a échappé à la première attaque.

Pour cela, après avoir pesé la silice, on la fond au creuset de platine avec 4 grammes de carbonate de soude. La liqueur chlorhydrique de séparation de la silice (ainsi débarrassée des dernières traces d'alumine) est jointe à celle qu'on a obtenue lors de la première attaque.

Recherche et dosage des alcalis. — Cette opération s'exécute exactement comme dans le cas d'un verre. Le lecteur pourra donc se reporter à ce que nous avons dit plus haut.

20. — Dosage du sable libre. — Les argiles sont constituées, avons-nous dit, par un mélange de silicates avec une proportion plus ou moins grande de sable. On se rend parfaitement compte de ce fait, en soumettant une argile ou terre crue à l'action d'un courant d'eau ; l'argile forme une bouillie, une sorte de matière laiteuse qui est entraînée par le liquide, tandis que le sable, en raison de sa forte densité, tombe au fond du vase où se fait la lévigation. On remarque alors généralement que le sable n'est pas de grosseur uniforme, mais que, à côté de grains relativement gros, il s'en trouve qui constituent toute l'échelle de grosseur jusqu'à la poudre impalpable.

On s'est appuyé sur cette propriété de l'argile de former avec l'eau une bouillie ne se déposant que très lentement, et par conséquent pouvant être entraînée par un

courant d'une vitesse excessivement faible, pour opérer le dosage du sable dans les argiles.

Comme la grosseur du sable entrant dans la constitution d'une argile a une influence considérable sur la manière dont celle-ci se comporte au feu, il était utile de classer ce sable par grosseurs.

C'est pour réaliser ce classement que l'appareil à léviger est constitué par une série généralement composée de cinq vases de grandeur différente, où la vitesse d'écoulement du liquide va décroissant du plus petit au plus grand (*fig.* 9).

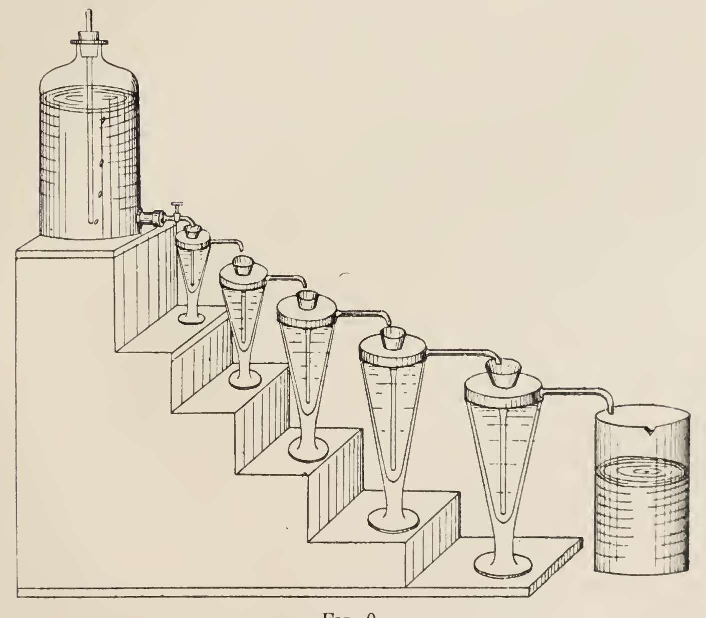


Fig. 9.

Cependant, quelque faible que soit la vitesse donnée au courant d'eau, il est impossible de recueillir la totalité du sable, il s'en échappe toujours à l'état de poudre impalpable ; néanmoins, cette méthode est bonne à em-

ployer à cause des renseignements utiles qu'elle fournit sur la grosseur du sable.

Voici le mode d'application du procédé :

L'essai se fait sur l'argile crue, c'est-à-dire contenant encore l'eau combinée aux silicates.

On en prend 50 grammes qu'on met en digestion dans un ballon avec un litre d'eau distillée. On porte à l'ébullition et on agite fréquemment, pour mettre en suspension le dépôt qui tend à se rassembler au fond du ballon.

Sous l'influence de l'ébullition et de l'agitation, la terre se délaye peu à peu et finit par arriver à l'état de bouillie. A ce moment, les grains de sable sont bien débarrassés de l'argile qui les entourait. Pour atteindre ce résultat, il faudra laisser la fiole au moins pendant vingt-quatre heures sur le bain de sable et agiter toutes les heures.

Quand la terre est bien en bouillie, on verse le contenu du ballon dans le premier verre supérieur (le plus petit) et on rince avec de l'eau chaude qu'on amène également dans ce verre. On fait alors arriver l'eau du flacon de Mariotte avec la vitesse qu'on désire avoir.

L'argile pure très fine est entraînée et est recueillie dans un grand dépotoir placé à la suite du cinquième verre. Ce dépotoir devra être de capacité suffisante pour contenir toute l'eau qu'il sera nécessaire d'employer, soit 15 à 20 litres. A défaut de récipient d'aussi grande capacité, on fera usage de deux ou trois vases plus petits.

On laissera se continuer l'écoulement de l'eau, jusqu'à ce que le liquide du troisième verre soit parfaitement clair. A ce moment, on ferme le robinet du flacon de Mariotte et on laisse déposer. Le dépôt se fait presque instantanément dans le premier verre, très rapidement dans le deuxième et le troisième ; mais, pour les deux autres et surtout pour le dépotoir, il faudrait plusieurs

jours. On rend la précipitation plus rapide en ajoutant dans ces vases un peu d'acide chlorhydrique (5 centimètres cubes environ par litre de liquide).

Au bout de vingt-quatre heures, on décante et on recueille, chacun sur un filtre, les dépôts des cinq verres et du dépotoir.

Il n'y a évidemment qu'un lavage sommaire à faire subir aux dépôts ; on les rassemble simplement au fond du filtre et on pèse après dessiccation.

21. — Essai pyrométrique des argiles et des produits réfractaires. — Dans la pratique des verreries, où l'on fait usage d'argiles d'une pureté relativement grande, les résultats de l'analyse chimique sont généralement suffisants pour faire connaître le degré de résistance au feu que présenteront les argiles.

Il nous paraît superflu de leur faire subir l'essai pyrométrique préconisé par Bischof, essai qui consiste à comparer la fusibilité d'une argile donnée à celle d'une argile de composition invariable préparée par synthèse, à l'aide d'un mélange à poids égaux de silice et d'alumine.

L'argile à essayer est additionnée d'alumine ou d'acide silicique de façon que, pour une température déterminée, elle se comporte comme l'argile normale. De la quantité des substances ajoutées, on déduit un nombre qui représente le degré de résistance au feu de l'argile à essayer par rapport à l'argile normale.

Si l'essai pyrométrique des argiles ne présente qu'un intérêt secondaire, il n'en est pas de même de celui des produits fabriqués, dont les qualités réfractaires sont liées, non seulement à l'argile, mais aussi et surtout à la teneur et à l'état physique des dégraissants.

Les résultats de l'essai pyrométrique, comparés à ceux

que donnent, dans les mêmes conditions de température, des témoins de composition et de résistance connues, présentent dans ce cas un très grand intérêt.

On emploie avec avantage pour ces essais le four imaginé par M. Audoin, ingénieur en chef de la Compagnie parisienne du gaz. Ce four, de dimensions très restreintes, est chauffé par un brûleur Sainte-Claire Deville et alimenté par des huiles lourdes de pétrole ou par du goudron (*fig.* 10).

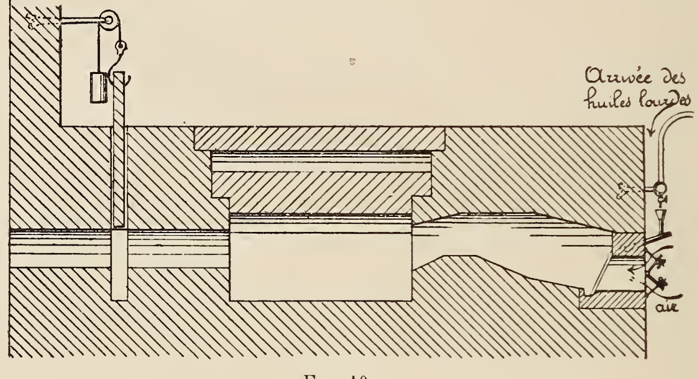


Fig. 10.

On peut obtenir dans ce four une température excessivement élevée, susceptible de fondre en quelques heures les matériaux réfractaires les plus résistants. Aussi doit-on prendre soin de garnir les parois intérieures du four d'une chemise en matériaux infusibles, tels que plombagine mélangée à de l'argile, magnésie, bauxite ou silice.

Ces essais peuvent également s'exécuter dans un four à gaz d'invention récente, qui est construit par M. Bigot, avec la collaboration de M. Lequeux. Ce four est basé sur la récupération partielle de la chaleur, principe depuis longtemps adopté dans l'industrie, mais qui n'avait pas

encore été employé dans les laboratoires pour ce genre d'appareils.

Le four Bigot peut donner, au bout de deux heures, une température de 1 300° et atteindre 1 500° en trois heures. Si le tirage est excellent, on y peut fondre le nickel (1 450°) en moins de deux heures. Si on se rappelle que le nickel ne fond pas dans les fours à porcelaine, on peut être assuré que le four Bigot remplit les conditions voulues pour l'essai des produits réfractaires.

22. — Fabrication des matériaux réfractaires, creusets, dalles, briques, etc., pour une verrerie. — On donne le nom de céramique au travail de l'argile, du nom d'un quartier de Vienne où se trouvait réunie la corporation des potiers.

L'argile employée sans mélange ne convient pas pour la poterie ; elle retiendrait une trop grande quantité d'eau qui, ne trouvant que difficilement passage, s'échapperait avec force en fendillant l'objet. On obvie à cet inconvénient en ajoutant à l'argile des matières non plastiques appelées communément dégraissants ou ciments.

Ces matières sont généralement constituées par du sable, de l'argile cuite ou calcinée, ou des débris de matériaux réfractaires, dont on trouve ainsi l'utilisation judicieuse.

Les dégraissants sont mélangés à l'argile en proportions qui varient avec leur nature et leur composition chimique, et suivant le résultat qu'on en veut obtenir. Leur ensemble constitue la pâte céramique, dont la préparation comporte les diverses phases que nous indiquerons sommairement ci-dessous.

L'argile réduite en menus fragments, pour en éliminer

les matières impures, est ensuite broyée et tamisée, puis mélangée aux dégraissants également en poudre.

L'ensemble est mélangé intimement à sec, puis amené, par addition d'eau, à l'état de pâte plus ou moins malléable, dans un appareil malaxeur.

Généralement ce malaxeur consiste en un cylindre en fonte disposé verticalement ; dans l'intérieur de ce cylindre se meut un arbre portant des palettes disposées en hélice, lesquelles, dans leur mouvement circulaire, obligent la matière à prendre dans le cylindre, outre le mouvement de rotation, un mouvement vertical de haut en bas.

La pâte recueillie à la partie inférieure est rejetée à plusieurs reprises dans l'appareil, jusqu'à ce qu'elle ait atteint la plasticité et l'homogénéité convenables.

On fait maintenant quelquefois usage d'un malaxeur disposé horizontalement et constitué par une sorte de pétrin mécanique, analogue à ceux qu'emploient les boulangers.

Quoi qu'il en soit, à sa sortie du malaxeur, la pâte est laminée entre deux cylindres animés de vitesses différentes et distants l'un de l'autre de quelques millimètres seulement. Il en résulte un étirage qui contribue à accroître l'homogénéité.

Ensuite la terre est transportée dans un lieu frais et humide, où elle séjourne pendant un temps plus ou moins long et où elle subit le phénomène auquel on a donné le nom de « pourrissage ».

Le pourrissage n'est pas considéré par tous les praticiens comme une phase indispensable ; cependant l'expérience a démontré que, pendant cette période, la plasticité de la pâte s'accroît de façon notable, et que les pièces fabriquées prennent moins de retrait par suite d'une

répartition uniforme de l'humidité dans toute la masse.

Un pourrissage prolongé aide en outre à l'achèvement de la décomposition des particules de roches feldspathiques ou granitiques qui accompagnent généralement les argiles.

Les matières organiques sont également décomposées ; c'est ce que l'on constate à la coloration noire que prend la pâte, surtout à l'intérieur, et au dégagement d'hydrogène sulfuré.

Après le pourrissage, les pâtes céramiques présentent les conditions requises pour être mises en travail.

Nous ne parlerons pas de la fabrication des briques ou des tuiles réfractaires, qui s'obtiennent par le même procédé de moulage que les briques communes. Il convient de noter cependant qu'en raison de la fatigue qu'auront à subir ces pièces il est nécessaire d'apporter les soins les plus minutieux à leur fabrication.

23. — Creusets de verrerie. — Les creusets sont fabriqués avec ou sans moule, et on ne remarque pas qu'il y ait de différence sensible, comme qualités de résistance, entre les creusets obtenus par l'un ou l'autre procédé. L'emploi du moule a l'avantage de donner au creuset une capacité uniforme.

Que le creuset soit fabriqué à la main ou au moule, l'ouvrier commence d'abord par préparer le fond. A cet effet, il dispose, bien horizontalement, sur un support à quatre pieds, une sorte de table en bois ou « fonceau » ayant la forme du fond du creuset. Sur ce fonceau il place une couche de gravier ou de grains de ciment ayant une épaisseur de 1 à 2 centimètres, qu'il recouvre d'une toile commune (analogue à celle sur laquelle on colle les papiers de tenture des appartements). Sur cette toile, le

potier dispose quelques morceaux, « pastons », de terre et les étale de façon à en couvrir toute la surface du fonceau.

Ensuite il jette avec force, sur cette première couche, une série de petits pastons qu'il soude les uns aux autres en les appuyant fortement avec les mains. Il donne à cette seconde couche une épaisseur telle que le fond se trouve être plus épais qu'il ne le sera après achèvement du travail.

A ce moment, si le pot doit être fait au moule, on apporte et place sur le fonceau les deux pièces mobiles qui constituent le moule (*fig.* 11).

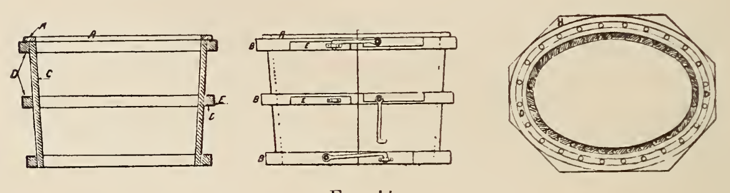


Fig. 11.

A, jante en sapin rapportée.
B, — frêne ou orme.
C, douve en sapin fixée à la jante par des vis à bois.
D, cercles en fer en dessus et en dessous et entaillés dans la jante.
E, platine en fer pour adapter les crochets de serrage.
H, entourage à 6 pans de la jante inférieure.

On les réunit par des clavettes et on ferme ainsi le fond du creuset. Sur les parois intérieures du moule on dispose des bandes de toile qui empêcheront l'adhérence de la pâte contre les parois.

L'ouvrier gratte alors le fond et applique l'excédent de terre contre les parois du moule. Cette manière de faire a pour but de rendre solidaires le fond du creuset et les parties verticales voisines ou « tige ». L'ouvrier continue ensuite à appliquer le long des parois des mottes de terre en apportant toute son attention à les souder d'une manière parfaite les unes aux autres.

Quand le moule est ainsi garni jusqu'au haut, le potier raffermit les parois en les battant à l'aide d'un outil de verre ou de bois, puis il les lisse à l'aide d'un polissoir terminé par une partie arrondie, puis enfin en faisant usage d'une éponge imbibée d'eau.

Il ne reste plus alors qu'à enlever le moule (opération à laquelle on ne procède que le lendemain) et à polir le creuset à l'extérieur. Ensuite, au moyen d'un outil très simple, quand il s'agit de creusets de glacerie, on creuse un chanfrein, une ceinture, tout autour et environ à mi-hauteur du creuset, puis on recouvre les bords de bandes de toile mouillée afin d'éviter une dessiccation trop rapide en ces points. Au bout d'un temps plus ou moins long, suivant la rapidité de la dessiccation, en enlève les toiles, on renverse les creusets pour en hâter la dessiccation et en régulariser le séchage.

La fabrication des creusets exige de la part de l'ouvrier, surtout s'il travaille sans moule, un certain tour de main qui nécessite, pour être acquis, un apprentissage d'assez longue durée. Dans le but d'éviter cette main-d'œuvre spéciale, toujours onéreuse, on a tenté la fabrication au moyen d'appareils mécaniques.

On comprend facilement quel est le mode d'opérer. Dans un moule en fer très résistant, on place de la terre en quantité un peu plus que suffisante que celle qui est strictement nécessaire pour la composition d'un creuset. On fait ensuite descendre un mandrin ayant extérieurement la forme que devra présenter le creuset à l'intérieur. Dans ce mouvement, la terre est pressée et refoulée, entre le moule et le mandrin, vers la partie supérieure du moule.

Soulevant ensuite le mandrin, on enlève l'excédent de terre et on termine les bords du creuset à la main.

6

Ce mode d'opérer a l'avantage de permettre la mise en œuvre de pâte beaucoup plus dure, contenant moins d'eau, d'où une dessiccation plus rapide des pots et économie de chauffage. On n'a pas remarqué que les creusets ainsi obtenus soient de moins bonne qualité que ceux qui sont faits à la main.

Dessiccation des creusets. — La dessiccation des creusets est une opération qui demande à être conduite avec les plus grands soins. Quand une chambre de poterie est remplie de creusets nouvellement fabriqués, on en élève graduellement la température, de façon à faire passer insensiblement, et en deux ou trois mois, de la température ordinaire à la température de 35° à 40°.

Une variation brusque de température aurait généralement pour effet d'amener des gerçures ou fendillements, qui compromettraient la solidité des creusets, et même quelquefois les mettraient absolument hors d'usage.

Les foyers ordinaires ne permettent que difficilement d'obtenir une température bien uniforme et exempte d'à-coups. Aussi croyons-nous qu'on se trouvera bien de les remplacer par les calorifères Perret.

Ces foyers, étudiés en vue de l'utilisation de combustibles pauvres et menus, présentent l'énorme avantage de pouvoir être alimentés à l'aide des résidus combustibles et des déchets de toute nature dont toutes les usines ne savent généralement que faire. Le principe consiste à opérer la combustion sur une série de dalles superposées, et à faire circuler le combustible d'un étage à l'autre, de façon à le sortir complètement brûlé, en bas du foyer.

Le foyer est à trois, quatre ou cinq étages, formés chacun d'une voûte légèrement cintrée en terre réfractaire (*fig.* 12).

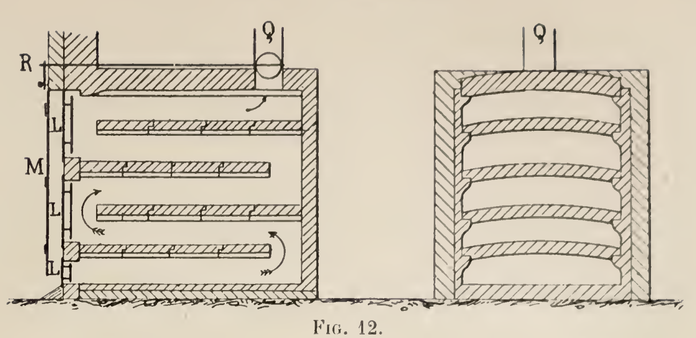


Fig. 12.

L, portes de chargement.
Q, cheminée se terminant par un tuyau qui traverse la chambre à chauffer.
R, registre pour régler la marche du foyer.

Ces voûtes reposent à leurs extrémités sur des supports en maçonnerie. Des portes de service permettent de faire descendre le combustible et de régler la marche du foyer en procédant à des charges plus ou moins fréquentes.

Depuis la première application de ces foyers, M. Perret a apporté dans leur construction diverses modifications heureuses qui ont amélioré leur rendement, tout en les rendant aptes à utiliser des combustibles de plus en plus pauvres.

Un premier perfectionnement a consisté dans la substitution aux dalles primitives pleines de dalles percées de trous. Avec cette disposition, le combustible, au lieu d'être réparti sur les dalles en une couche plus ou moins épaisse, se trouve disposé en amas de forme conique qui reçoivent l'air sur toute leur surface, ce qui assure une combustion parfaite.

Une autre modification très importante est celle qui consiste à effectuer le chauffage, non pas directement par les produits de la combustion, mais en lançant dans la pièce à chauffer un courant d'air échauffé au détriment de la chaleur que possèdent les gaz brûlés.

A cet effet, ceux-ci, avant d'être évacués vers la cheminée, circulent dans des carneaux ou enveloppes métalliques qu'ils échauffent, et autour desquels passe constam-

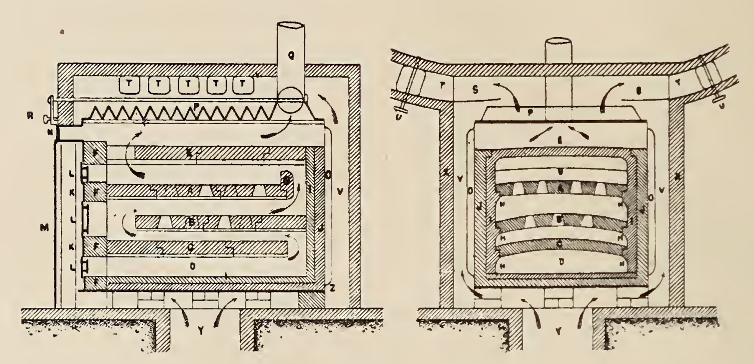


Fig. 13.

A, étage de chargement en dalles perforées.
B, étage intermédiaire en dalles perforées.
C, étage en dalles pleines.
D, cendrier.
E, étage de couverture en dalles pleines.
F, plaque à lunette réfractaire.
G, autel réfractaire.
H, sommiers réfractaires supportant les dalles.
I, parois réfractaires du foyer.
J, garniture en matière isolante.
K, devanture en fonte.
L, portes de chargement et de service.
M, porte-écran en tôle pour éviter le rayonnement.
N, tampon de ramonage.
O, parois en tôle maintenue par les fers à I formant l'armature du foyer.
P, surface de chauffe à ailettes creuses.
Q, cheminée.
R, registre à cadran pour régler la marche du foyer.
S, diaphragme pour obliger l'air à passer dans les ailettes.
T, conduite de chaleur.
U, registre pour régler la vitesse de l'air chaud.
V, espace vide pour le passage de l'air.
X, murs d'enveloppe formant chambre de chaleur.
Y, prise d'air, communiquant soit avec l'extérieur, soit avec l'intérieur de la pièce à chauffer.
Z, plaque de fonte supportant le fond du foyer.

ment un courant d'air, déjà échauffé par les parois du foyer.

Cet air froid n'est pas pris à l'extérieur, mais dans la pièce à échauffer ; il en résulte dans cette pièce un mou-

vement continuel de l'air, ce qui assure une répartition parfaite de la température.

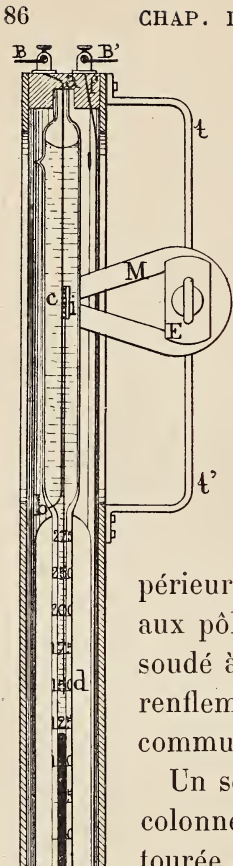
La figure 13 représente un foyer muni de dalles perforées et disposées de façon à réaliser le mode de chauffage par courant d'air, dit « chauffage en boucle », dont nous venons de parler.

Dans ce foyer, on arrive à utiliser et à brûler complètement des combustibles menus, en poussière même, et très pauvres. Nous avons pu, grâce à ces foyers, tirer un bon parti des résidus de foyers industriels ne contenant pas plus de 25 0/0 de carbone. Nous ajouterons que les cendres, complètement brûlées, qu'on retire de la dalle inférieure, peuvent être avantageusement utilisées à la fabrication d'un excellent mortier.

En terminant ce qui a trait à la dessiccation des pièces réfractaires et en particulier des creusets de verrerie, nous insisterons à nouveau sur la nécessité absolue de conduire le chauffage d'une façon lente et progressive.

On se trouvera bien, afin d'éviter les à-coups rendus déjà moins fréquents par l'emploi des calorifères Perret, de disposer dans les chambres où sont fabriqués les creusets des thermomètres avertisseurs dont il existe divers types, parmi lesquels nous recommandons spécialement le thermomètre avertisseur électrique qui vient d'être récemment présenté à l'Académie par son inventeur, M. Barillé.

Cet appareil présente l'avantage de pouvoir être employé comme avertisseur pour toutes les températures comprises entre deux points, aussi distants qu'on le veut, de l'échelle thermométrique, tandis que les thermomètres électriques basés sur le même principe ne sont gradués que pour une température déterminée et fixée à l'avance comme limite.



Il en résulte qu'à l'aide d'un seul appareil il devient possible de suivre la marche de la dessiccation depuis le moment de la fabrication, où la température est de 16° à 18°, jusqu'au complet séchage, pour lequel une température de 40° à 45° est nécessaire.

Ce nouvel appareil (*fig.* 14) se compose d'un thermomètre ordinaire à mercure dont la tige se renfle légèrement au-dessus de la graduation limite. La gaine métallique qui renferme l'appareil porte à la partie supérieure deux bornes B et B′, qui sont reliées aux pôles d'une pile. Un fil métallique *ab* est soudé à ses deux extrémités dans le verre du renflement supérieur, son extrémité *a* est en communication métallique avec la borne B.

Un second fil *cd* se trouve à l'intérieur de la colonne thermométrique ; son extrémité *c* entourée en spirale autour du fil *ab* porte un index en acier *i*, cet index peut être amené en un point quelconque de *ab* à l'aide d'un aimant M, il entraîne avec lui le fil *dc* ; on peut de cette façon amener l'extrémité *d* en un point quelconque de l'échelle thermométrique. L'aimant M

Fig. 14.

BB′, bornes reliées aux pôles d'une pile.

ab, fil métallique soudé à la tige du thermomètre en *a* et *b*.

L'extrémité supérieure du fil est reliée à la borne B

cd, fil métallique dont l'extrémité *c* est enroulée en spirale autour du fil *ab*.

La spirale porte un index en acier *i* qui permet, au moyen de l'aimant M de faire mouvoir le fil *cd* tout le long du fil fixé *ab*.

On peut ainsi amener l'extrémité *d* à se trouver en regard en tel ou tel point de la graduation.

ef, fil métallique soudé à son extrémité *e* à la boule du thermomètre et relié en *f* à la borne B′.

peut se déplacer le long d'une tige *tt′* ; on *le fixe à l'aide*

d'un écrou E. Un troisième fil *ef*, partant de la borne B', vient aboutir en *e* où il est soudé dans le réservoir du thermomètre.

Dès que la température correspondante à la position de l'extrémité *d* est atteinte, le circuit B'*edca*B est fermé par le mercure et met en mouvement une sonnerie placée sur le parcours du courant.

Cuisson des creusets. — Quand les creusets sont bien secs et en état de passer aux fours, on les enlève des chambres et on les porte dans une enceinte « arche », où on les amène lentement à la température rouge. Ce chauffage, cette cuisson des creusets et, en général, de toutes les pièces de poterie exige d'être faite bien graduellement sous peine d'amener des tressaillements, des gerçures et même des fentes qui mettraient le creuset hors d'usage.

La cuisson dans les arches doit, pour être bien faite, être poussée à un point très élevé, si possible à la température à laquelle sera soumis le creuset à son entrée au four.

24. — Matériaux pour la construction des fours. — Les fours de verrerie sont construits en matériaux réfractaires de composition analogue à celle des creusets. Cependant, on se contente généralement d'y faire entrer les déchets de cette fabrication ; d'autre part, on emploie les dégraissants sous forme de grains plus gros.

Depuis quelque temps on essaye de substituer aux briques en argile réfractaire des produits uniquement composés de magnésie. Cette application a déjà donné d'excellents résultats dans les fours à acier Martin Siemens, pour la construction des voûtes, des brûleurs et des descentes de flammes dans les régénérateurs.

Pour cet usage, la Société des travaux publics et com-

munaux d'Athènes fabrique des briques en magnésie qui, assure-t-on, donnent à la voûte des fours à acier une durée illimitée, tout en permettant d'élever la température à un degré inconnu jusqu'à ce jour.

La magnésie est obtenue par calcination du carbonate de magnésie à une température très élevée, et telle que les dernières traces d'acide carbonique sont chassées complètement. Par cette surcuisson, la magnésie se trouve rendue insensible à l'humidité et à une carbonatation ultérieure.

La cuisson donne une matière qui, grainée entre 2 et 4 millimètres, agglomérée avec un quart de cette même magnésie surcuite, mais amenée à l'état de folle farine impalpable, permet de la mouler comme les bonnes briques réfractaires. Pour cela, la farine de magnésie est additionnée d'eau, pour en faire un mortier avec lequel, par un bon malaxage, on agglomère les grains de 2 à 4 millimètres.

On moule, on sèche et on rebat comme pour les briques réfractaires. La cuisson est obtenue dans un four à gaz où la température atteint le point de fusion du platine.

§ 2. — Fours de verrerie

Nous ne parlerons pas des fours chauffés au bois, qu'on ne rencontre plus que dans quelques petites verreries de Bohême ; nous ne ferons que mentionner les fours à chauffage direct par la houille, qui sont presque complètement abandonnés et remplacés par les fours à gaz [1].

Avant de nous occuper avec quelques détails de ces

[1] Nous avons pensé que le lecteur pourrait trouver intéressant d'établir une comparaison entre les anciens fours chauffés au bois ou à la houille et les fours actuels chauffés au gaz. Dans ce but, nous avons rassemblé, dans les planches I et II, quelques-unes des dispositions anciennement adoptées.

derniers, nous donnerons la description sommaire de deux fours mixtes, four Boétius et four Quennec qui constituent la transition entre le chauffage direct à la houille et le chauffage au gaz.

25. — Four Boétius. — Le principe du four Boétius repose sur la combustion méthodique du charbon et se distingue surtout des fours à combustion directe par l'échauffement de l'air destiné à la combustion, et le mélange intime de l'air ainsi chauffé avec les gaz combustibles du foyer.

Ce four (*fig.* 15, 16, 17) se compose du four de fusion proprement dit *a* et des deux générateurs à gaz *bb'* situés directement au-dessous du four et séparés par un massif central *c*.

Ces générateurs sont des foyers à grille inclinée dont le fond est formé par le massif central *c*, et dont les parois s'élèvent, en se rétrécissant, jusqu'au siège du four, où elles se continuent, à travers ce siège, par des lunettes *ll'* débouchant dans le four et servant à amener le gaz.

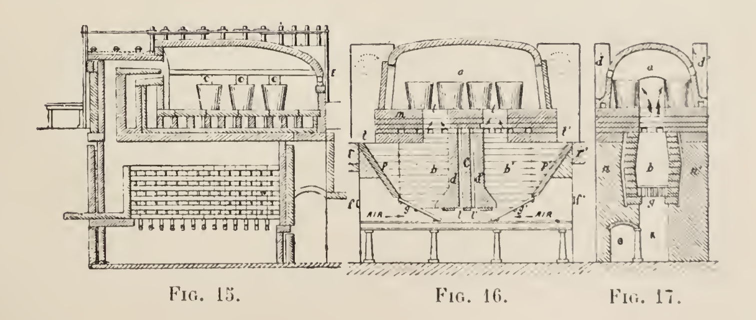


Fig. 15. Fig. 16. Fig. 17.

En *gg'*, sont les grilles reliées aux portes de chargement *tt'* par des plans inclinés *pp'*. Sous chaque grille s'étend un couloir appelé cave, pour l'enlèvement des résidus.

Les cheminées *dd'* ménagées dans les piliers d'ouvreaux servent à l'évacuation des produits de la combustion.

Ce chauffage de l'air comburant a amené une économie notable sur les anciens foyers à chauffage direct. Comme autres avantages, il convient de signaler: la facilité plus grande de la conduite du four, la production de verre plus beau, mieux affiné, se maintenant plus longtemps malléable.

La présence des gazogènes sous le massif même du four présentait un sérieux inconvénient au point de vue de la stabilité ; en outre, il se produisait assez fréquemment des entraînements de parcelles de houille qui venaient souiller le verre. M. Tocke, sur les conseils de M. Boétius, a obvié à ces inconvénients en reportant les gazogènes à une certaine distance du four auquel ils sont reliés par un conduit en maçonnerie.

En 1885, M. Appert a apporté quelques perfectionnements au four primitif de Boétius, perfectionnements qui consistent dans l'établissement de chicanes le long des parois verticales des gazogènes et dans le damier disposé sous le four. Dans ces chicanes on fait circuler l'air destiné à la combustion ; cet air s'échauffant, au détriment des massifs, en réduit l'usure dans une proportion notable, en même temps qu'il permet d'obtenir dans le four une plus haute température de combustion. On réalise donc, du même coup, une double économie en réduisant la dépense de combustible et les frais d'entretien ou de reconstruction.

Les fours ainsi modifiés sont employés dans un grand nombre de verreries produisant la gobeleterie en demi-cristal.

26. — Four Quennec. — M. Quennec, maître de

verrerie à Semsalles (Suisse), a adopté une disposition analogue.

Dans le four Quennec, qui est à fusion et à travail continus (*fig.* 18), les grilles A lancent directement le gaz qu'elles produisent, dans le four B, après toutefois mélange de ce gaz avec de l'air chauffé au préalable dans des carneaux disposés le long des parois du foyer et du four.

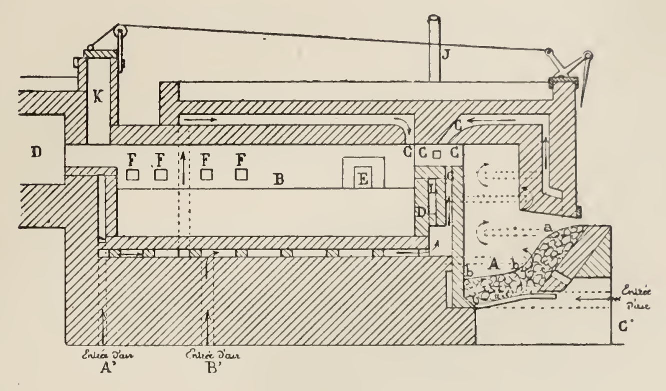


Fig. 18.

Ce four n'a pas de cheminée d'évacuation des produits brûlés. Ces derniers s'échappent librement dans la halle. A l'extrémité de leur parcours ils servent à chauffer, à fritter les matières vitrifiables.

Fours à gaz. — Les premiers essais de chauffage par le gaz des fours de verrerie ont été tentés par Fickentscher, de Swickau (Saxe). On faisait usage de lignites. Ce combustible produisant beaucoup de goudrons, il en résultait de fréquentes obstructions dans les conduits amenant le gaz au four. On ne put parer à cet inconvénient qu'en soumettant le gaz à un lavage à l'eau, ce qui eut pour conséquence malheureuse de refroidir le gaz et de nécessiter l'emploi d'un ventilateur pour l'amener au four.

Pour ces diverses raisons, l'essai fut rapidement abandonné.

Il convient cependant de rappeler que l'idée du lavage du gaz des gazogènes a été reprise depuis, et que dans certaines circonstances elle a donné des résultats avantageux.

Si l'on remarque, en effet, que le gaz provenant de la distillation de la houille contient, à l'état d'ammoniaque, la majeure partie de l'azote que ces houilles renferment, on se rend compte de l'intérêt qu'il peut y avoir dans certains cas spéciaux — emploi de houilles particulièrement azotées, situation dans une région où les débouchés de sels ammoniacaux pour l'agriculture sont assurés — à recourir au lavage du gaz.

Sans entrer dans le détail de la question, nous dirons que pratiquement, et à peu de frais, on peut recueillir, par tonne de houille brûlée dans un gazogène, 2 à 3 kilogrammes d'ammoniaque, soit près de 8 kilogrammes de sulfate d'ammoniaque.

27. — Four Siemens. — En 1856, MM. Siemens frères eurent l'idée d'utiliser la chaleur que possèdent les gaz de la combustion au chauffage du gaz combustible et de l'air comburant.

Avant que cette idée fût mise à exécution, les fours à gaz, ou plutôt les fours mixtes dont nous venons de parler, ne pouvaient procurer d'économie sérieuse sur le chauffage direct. Les seuls avantages qu'ils présentaient — et dont l'importance est d'ailleurs loin d'être négligeable — résultaient d'une réduction de la main-d'œuvre et d'une meilleure qualité des produits.

Il en fut tout autrement quand le principe de la récu-

pération fut appliqué par M. Siemens [1]; aussi le nouveau mode de chauffage fut-il, en très peu de temps, adopté dans toutes les industries du feu, fonderies, verreries, etc.

On a apporté, depuis, quelques modifications plus ou moins heureuses à la disposition première adoptée par les frères Siemens; nous en indiquerons quelques-unes parmi celles qui nous paraissent présenter un réel intérêt; mais auparavant nous donnerons la description détaillée du four primitif.

Le four Siemens à chaleur régénérée se compose de trois parties :

1° Le gazogène, où le combustible est transformé en gaz;

2° Les régénérateurs ou récupérateurs qui constituent la partie essentielle;

3° Le four lui-même, dont la forme est variable suivant sa destination.

Gazogène. — Cet appareil (*fig.* 19) est constitué par une cuve en maçonnerie limitée au fond par une paroi légèrement inclinée, sur les deux côtés, par des murs verticaux distants l'un de l'autre de 1m,50 à 2 mètres, et à la partie antérieure par un plan incliné faisant avec la verticale un angle de 45° à 60°.

Cette paroi antérieure est munie de regards par lesquels, au moyen de pinces, l'ouvrier brasse le combustible.

Dans le bas, cette même paroi est prolongée par une

[1] Les diverses industries du feu, métallurgie, verrerie, etc., sont redevables aux frères Siemens, originaires de Dresde, des progrès étonnants qu'elles ont accomplis dans la seconde moitié de ce siècle.

Ces savants et hardis novateurs ont, avec succès, porté leurs efforts sur l'amélioration des procédés de chauffage.

Williams Siemens et son frère Frédéric s'associèrent et fondèrent à Londres et à Dresde des maisons qui se sont fait dans le monde entier une réputation justement méritée.

A la mort de Williams (qui s'était fait naturaliser Anglais et qui est enterré à Westminster), son frère Frédéric a repris la maison de Londres.

grille présentant la même inclinaison. Cette grille est généralement constituée par cinq barrettes en fer supportées à leurs extrémités par des arrêts encastrés dans les parois verticales.

L'écartement des parois latérales est maintenu par une voûte dans laquelle sont pratiqués plusieurs orifices. Deux d'entre eux, munis de trémies à bascule, sont destinés aux chargements ; deux autres sont des regards destinés à suivre la marche de l'appareil et au besoin pour tasser la masse de combustible. Un autre orifice à section rectangulaire est destiné à laisser passage au gaz, qui se rend au four directement si ce dernier ne comporte qu'un seul gazogène, ou dans un canal collecteur dans lequel se réunit le gaz produit par un groupe ou batterie de gazogènes, si le four nécessite plusieurs de ces appareils.

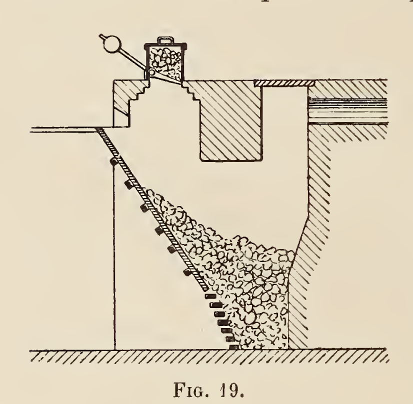


Fig. 19.

Le gaz recueilli dans le canal collecteur est conduit dans une cheminée verticale en tôle de 4 à 5 mètres de hauteur, qui se continue par un tuyau horizontal suspendu, d'une longueur de 10 à 12 mètres. A son autre extrémité, ce tuyau se recourbe à angle droit et se termine par une cheminée verticale descendante dont la partie inférieure est reliée au four par un canal établi à niveau du sol.

Dans son trajet à l'intérieur de ce tuyau réfrigérant (*cooling-tub*) le gaz perd par rayonnement une grande partie de sa chaleur. Il en résulte que, dans le tuyau descendant, le gaz notablement refroidi, et par suite plus dense, acquiert une certaine vitesse. L'ensemble des deux

cheminées et du conduit horizontal constitue en somme un immense siphon dans lequel le mouvement du fluide est assuré par une différence de densité.

L'application de ce principe a permis à M. Siemens d'éviter l'emploi du ventilateur pour le transport du gaz des gazogènes au four.

Il faut bien remarquer que ce transport n'est possible que grâce à une perte de chaleur assez notable (en moyenne la température du gaz est abaissée de 300° pendant le trajet); aussi, afin d'éviter cet inconvénient, on préfère maintenant établir les gazogènes à un niveau beaucoup plus bas que la sole du four. Une différence de niveau de 4 à 5 mètres suffit largement pour assurer le tirage des gazogènes.

Régénérateurs. — Les régénérateurs sont des chambres en maçonnerie dans lesquelles on dispose, par rangs superposés, des briques réfractaires aménagées de manière à laisser des vides entre elles. On fait en sorte qu'à un vide d'un rang quelconque corresponde, pour le rang supérieur, une partie pleine, ce qui oblige les gaz qui circulent dans la chambre à suivre un parcours en ligne brisée.

Comme on a pour but en effet de soutirer aux gaz brûlés, produits de la combustion, la plus grande partie de leur calorique, il faut faire en sorte qu'aucune nappe de gaz ne puisse traverser la chambre sans rencontrer d'obstacle. Plus les filets de gaz seront divisés, c'est-à-dire plus on favorisera le contact de toutes les molécules avec les briques à échauffer, et meilleur sera le rendement.

On est donc amené à placer les briques en rangs très serrés et très chicanés, de façon à obtenir une surface de contact la plus grande possible, en même temps qu'une division extrême des filets gazeux.

Des raisons d'ordre pratique empêchent d'aller dans cette voie aussi loin qu'on le désirerait ; il faut remarquer en effet que les produits de la combustion entraînent généralement avec eux des particules de matières solides qui viennent s'attacher aux parois des briques et obstrueraient rapidement les vides ménagés à dessein, si ces derniers avaient une section trop faible.

Cet inconvénient a une importance notable, surtout en verrerie, où les produits entraînés sont constitués par les matières vitrifiables elles-mêmes, matières qui ont, à haute température, une action corrosive très marquée sur l'argile dont sont formées les briques d'empilage. (On donne le nom d'empilage à l'ensemble du massif des briques disposées par rangs superposés dans l'intérieur des régénérateurs.)

Les briques des rangs supérieurs sont attaquées, rongées par ces matières et transformées en un verre très dur, peu fusible, qui coule en s'étirant et vient obstruer les rangs inférieurs.

On est obligé, pour parer à cet inconvénient, de laisser entre les briques d'une même rangée horizontale un vide de section beaucoup plus grande qu'il ne serait strictement nécessaire.

Si, dans la construction d'un empilage, on doit chercher à avoir une grande surface de contact, il faut se préoccuper également du cube des briques. Chacune d'elles doit présenter une masse assez considérable qui, lorsqu'elle est bien échauffée, constitue une réserve de chaleur, le centre de la brique cédant une partie de son calorique à la surface à mesure que celle-ci se refroidit pendant la montée du gaz et de l'air froids.

D'une manière générale, la meilleure disposition est celle qui permet d'emmagasiner, dans un espace donné,

le plus grand nombre possible de briques, tout en fournissant des passages suffisants aux gaz et en offrant à ceux-ci le maximum de surface de contact.

D'après Siemens, il faut compter pour chaque chambre 25 à 30 mètres carrés de surface par tonne de houille brûlée en vingt-quatre heures, et la capacité totale des quatre chambres doit être de 3 à 4 mètres cubes, dont la moitié sera occupée par la masse des briques. Étant donné que les briques ont une densité de 1,80, c'est donc, pour les quatre chambres, un poids de 3 150 kilogrammes, soit par chambre 788 kilogrammes.

Quoi qu'il en soit de la disposition adoptée pour les briques empilées, les chambres de régénérateurs sont généralement groupées deux par deux. Les deux chambres de chaque groupe, dénommées l'une chambre à gaz, l'autre chambre à air (cette dernière de plus grande capacité que la chambre à gaz), communiquent constamment par le haut avec les orifices ménagés dans la sole ou les parois verticales du four. Leur partie inférieure peut se trouver en relation, soit pour toutes les deux à la fois avec la cheminée d'appel, soit séparément pour l'une avec le gazogène, et pour l'autre avec l'atmosphère.

L'appareil avec lequel on peut, à un instant donné, établir la communication d'un groupe de chambres avec la cheminée, ou l'intercepter pour les mettre en relation avec les gazogènes ou l'atmosphère, se nomme appareil d'inversion ou valve de renversement.

Le schéma (*fig.* 20) donne la disposition des quatre chambres et de la valve de renversement.

Les gaz sortant des gazogènes passent par la valve de renversement G, qui les dirige à la partie inférieure du régénérateur G_1G_1 ; l'air est admis par la valve A dans le

régénérateur A_1A_1. L'air et le gaz arrivent en B_1 dans la chambre de combustion.

Les flammes, après avoir traversé le four, passent par B, à travers les deux chambres G_2G_2, A_2A_2, et y abandonnent une partie de leur calorique avant de se rendre à la cheminée C.

Lorsque la circulation s'est ainsi faite pendant un certain temps (une demi-heure à une heure), on change la direction des courants en renversant les valves ; l'air et le gaz rentrent alors dans la seconde paire de chambres régénératrices A_2G_2, l'air en A_2, le gaz en G_2, où ils s'échauffent aux dépens de la chaleur emmagasinée dans les briques par les gaz descendants.

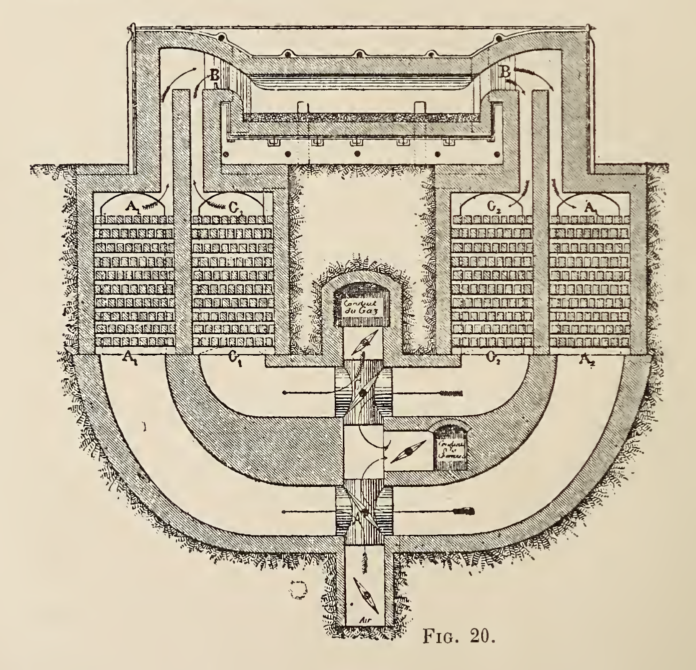


Fig. 20.

La pratique a démontré que le four à gaz Siemens présentait sur les fours à grille les avantages suivants :

Économie de combustible de 40 à 50 0/0 ;

Augmentation du travail obtenu 30 0/0 ;
Grande pureté et douceur de la flamme ;
Durée plus grande des fours ;
Économie de place dans les usines et grande propreté ;
Réglage à volonté de la chaleur et de la nature de la flamme ;
Absence complète de fumée à la cheminée d'appel.

Des différents modes de distribution des gaz dans les fours. — L'emploi du gaz a permis de donner aux fours une forme plus compacte, plus ramassée, ce qui, soit dit en passant, est encore une cause d'économie par suite de la diminution des pertes de chaleur par rayonnement.

Le foyer se trouvant réduit à quelques orifices de section relativement restreinte, il devient possible de le placer à un endroit où il n'apportera qu'une gêne insignifiante au travail exécuté dans le four.

Dans la disposition primitive de Siemens, ces foyers étaient situés aux quatre angles et les orifices étaient au niveau de la sole du four. La flamme agissait donc par contact.

Depuis 1884, M. Frédéric Siemens a émis une nouvelle théorie pour le chauffage des fours, et a établi ainsi qu'il suit le chauffage dit « par radiation ».

28. — Four Siemens à radiation. — Dans la première période de la combustion, qui est la période active, les flammes passent à travers une grande chambre à combustion et ne la chauffent que par leur chaleur rayonnante. Dans la seconde, les produits de la combustion sont mis en contact direct avec les surfaces à chauffer, auxquelles ils transmettent la chaleur produite par la combustion en l'ajoutant à celle résultant de la radiation des flammes.

Comme il importe, dans les fours qui réalisent l'application de ce principe, que les gaz en combustion ne perdent de leur chaleur que ce qui tient au rayonnement, il est absolument indispensable de faire les chambres à combustion assez grandes pour éviter le contact direct avec les parois. Les voûtes des fours et les conduites de fumée doivent être disposées de telle sorte que la combustion complète du gaz puisse s'effectuer avant que les flammes aient quitté la chambre à combustion. On obtient ainsi une chaleur plus intense et une durée de combustion plus longue que dans les fours ordinaires.

L'intensité de la chaleur et la durée de la combustion comportent des avantages que les fours ordinaires ne sauraient présenter. Les flammes perdent beaucoup de chaleur par le contact de leur surface avec les parois d'un foyer, ce qui serait difficile à expliquer s'il n'y avait, à côté de la combustion imparfaite, d'autres causes qui réduisent, en l'espèce, l'effet calorifique des flammes.

La flamme émet de la chaleur par rayonnement non seulement de sa surface, mais aussi de son intérieur, en la laissant passer à travers toute sa masse ; c'est ainsi que toute particule de flamme envoie des rayons dans toutes les directions ; mais, quand celle-ci touche aux parois, la combustion cesse aux endroits des contacts, et du carbone mis en liberté détermine la production de la fumée.

Cette dernière enveloppe une partie de flamme et empêche les rayons calorifiques des autres parties d'agir utilement et d'élever la température.

Dans tous les phénomènes de la combustion, le rayonnement joue un rôle beaucoup plus important qu'on ne le lui reconnaissait jusqu'ici ; par conséquent, toute cause qui tend à diminuer le pouvoir rayonnant de la flamme ou à en dévier les rayons réduit nécessairement la quan-

tité de chaleur qui peut être utilisée. Si la flamme se trouve hors de contact avec les objets qu'il s'agit de chauffer, la combustion s'améliore, et on tire du rayonnement tout l'avantage qu'il peut présenter. Le mode usuel d'application de la flamme, qui consiste à en faire embrasser les surfaces à chauffer, détermine une combustion imparfaite, empêche les rayons de chaleur d'élever la température de la flamme et tend par conséquent à la détruire. Cela se rencontre surtout lorsqu'on emploie des hydrocarbures ou de l'oxyde de carbone comme combustibles.

Cette manière de voir se trouve confirmée par les résultats que M. F. Siemens a obtenus dans les fours qu'il a expérimentés. Prenant en considération les phénomènes de dissociation, M. F. Siemens résume comme suit le mode d'action des surfaces chauffées. L'augmentation de température, en produisant l'expansion des gaz, réduit l'attraction mutuelle des atomes, ou, en d'autres termes, diminue leur affinité chimique. La raison de l'augmentation de chaleur, la tendance répulsive des atomes augmente jusqu'à ce que la décomposition ou la dissociation survienne. Ceci admis, il s'ensuit que l'attraction que les surfaces exercent sur les atomes des gaz, attraction qui croît avec la température, favorise la dissociation en augmentant la tendance répulsive des atomes. M. Victor Meyer, qui avait, le premier, contesté l'exactitude des résultats obtenus par M. Siemens, les a depuis acceptés. Nous avons été heureux d'apprendre ce fait, puisque leurs expériences confirment les résultats obtenus dans la pratique des fours. M. Meyer, dont l'autorité dans les questions de dissociation est généralement reconnue, a fait plusieurs expériences intéressantes qui ont fait ressortir l'exactitude de la théorie que nous venons d'exposer.

Par exemple, il faisait tomber, en gouttes, dans de l'eau, du platine fondu ; de l'oxygène et de l'hydrogène se dégageaient par suite de la dissociation de la vapeur.

Dans ce cas, la dissociation ne peut être contestée, mais il faut se demander si la chaleur en est la seule cause.

En premier lieu, il faut prendre en considération l'action dissociante que les surfaces chauffées du platine exercent sur la vapeur, et en deuxième lieu l'affinité qu'a le platine pour l'oxygène et l'hydrogène. Il en est de même d'une autre expérience où M. Meyer a fait passer de la vapeur à travers un tube de platine chauffé. Bien d'autres expériences pourraient être citées, dont les résultats confirment nos idées sur la question.

Il y a un autre phénomène démontré par l'expérience et lié avec la dissociation, qui doit être expliqué. Quand une flamme devient plus longue, on considère ce fait comme l'indice le plus certain du commencement de la dissociation.

Or, toutes les expériences de ce genre ont été faites avec des tubes étroits où l'influence des surfaces chauffées sur la dissociation devait entrer en jeu. Ce n'est pas seulement la chaleur qui, dans ces cas, détermine la dissociation, mais aussi l'influence des surfaces chauffées sur les gaz en combustion, surtout quand ceux-ci contiennent des hydrocarbures. L'allongement de la flamme est dû en partie à ce que les surfaces empêchent la combustion des gaz dissociés, en rétrécissant l'espace. Si la même flamme pouvait se développer dans un espace où les surfaces sont moins rapprochées, l'allongement ne pourrait pas se produire ; même, au contraire, au fur et à mesure de l'augmentation de température la flamme deviendrait plus courte.

Ce phénomène peut être observé dans les becs à gaz régénérateurs, dont la flamme est d'autant plus courte

que la température et, par conséquent, la lumière produite sont intenses. D'autre part, la flamme peut être allongée à volonté si elle est conduite à travers des passages étroits. On observe ceci dans les fours régénérateurs qui envoient des flammes jusqu'au sommet de la cheminée, si les soupapes sont arrangées de façon que les flammes, au lieu de passer à travers le foyer, entrent immédiatement dans le régénérateur et y brûlent.

La combustion proprement dite ne pouvant pas avoir lieu dans les voûtes du régénérateur, les flammes s'allongent jusqu'à ce que les gaz se refroidissent au rouge sombre et se transforment en épaisse fumée. Ainsi, dans ce cas, les grandes surfaces du régénérateur exercent la double action d'empêcher la combustion et de favoriser la dissociation.

Il résulte de ce que nous venons d'avancer que les fours à régénérateurs présentent de grands avantages pour les expériences, étant donné qu'ils offrent des résultats pratiques qui peuvent servir de base aux conceptions théoriques de la combustion et de la dissociation. Si la dissociation des produits de combustion a lieu, nous en voyons les conséquences dans une diminution de la chaleur, une diminution du rendement et la destruction des fours et des matériaux. Après avoir éloigné les causes de la dissociation, nous constatons l'élévation de la température, l'augmentation du rendement, la plus longue durée des fours et l'économie des matériaux.

Des résultats analogues peuvent être obtenus avec d'autres fours, mais les avantages n'en sont pas aussi grands que dans le cas des fours régénérateurs, étantdonné que l'intensité de la chaleur qui peut être produite par les premiers est moins grande que celle produite par les derniers.

Ce système de chauffage par radiation ou à flammes

libres a été appliqué aux fours de fusion dits « à bassin », dont nous donnerons plus loin la description, aux fours à pots avec introduction de flammes alternées par les pignons opposés du four ou par un seul pignon comme dans la disposition dite en fer à cheval. Ces exemples et ce que nous venons de dire suffisent pour faire reconnaître l'intérêt que présente l'application de la théorie de M. F. Siemens.

Les fours à fondre le verre sont appelés à bénéficier largement des avantages de ce nouveau système, comme durée des fours et économie de combustible.

29. — Fours à courants opposés. — M. Klattenhoff, directeur de verreries, à Jumet (Belgique), a pris, en 1882, un brevet pour un nouveau mode de répartition des flammes dans les fours à gaz, et M. de Boischevalier a donné une description de ce procédé.

La figure 21 indique le principe de l'invention. Le gaz entre dans la chambre de chauffage F à la fois de deux côtés en *aa*, l'air également de deux côtés en *bb*, tandis que les gaz brûlés s'échappent par les deux mêmes côtés dans le voisinage des entrées, par les ouvertures *cc*.

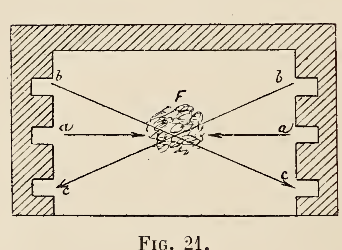


Fig. 21.

Il en résulte à l'intérieur de la chambre de chauffe des courants qui prennent approximativement la direction des flèches, et l'impulsion à l'introduction s'oppose à ce qu'une évacuation immédiate de gaz non brûlé venant de *a* s'opère par l'ouverture voisine *c*.

On peut, pour les besoins de la régénération, organiser un renversement périodique entre la direction de l'air et

celle des gaz brûlés, de façon à faire entrer l'air en *cc* et sortir les gaz brûlés par *bb* ; mais il faut, dans tous les cas, disposer les ouvertures d'introduction et d'évacuation en groupes se faisant vis-à-vis, et de plus, les rapprocher suffisamment entre elles dans chaque groupe pour qu'il en résulte une opposition de courants de flammes, et qu'au cas de renversement indiqué il ne se produise aucune modification sensible dans la direction de ces flammes. Cette possibilité du renversement, tout en conservant la même direction de flammes dans l'intérieur du four, constitue, comme nous le verrons plus loin, un avantage essentiel du système.

Il résulte du principe ainsi posé qu'il n'est pas nécessaire de se limiter à une seule ouverture à chaque tête ou de chaque côté de la chambre de chauffe ; on peut les multiplier, si l'on augmente en conséquence le nombre et la dimension des ouvertures pour l'air et les gaz brûlés, toujours dans le but d'obtenir une opposition de courants dans les conditions indiquées.

On peut donc également, au lieu de placer les ouvertures les unes au-dessus des autres, les disposer horizontalement ou au sommet d'un triangle, et l'on peut, s'il n'y a pas de renversements, réunir le gaz et l'air dans un brûleur avant l'entrée du four. Si même, à la rigueur on supposait une régénération pour le gaz avec renversement du courant du gaz, on pourrait disposer deux ouvertures *a* tout près l'une de l'autre ; nous ne signalons cette possibilité que pour mémoire, puisque nous avons fait remarquer au début qu'il n'y avait aucun avantage à chercher de ce côté.

Il faut, pour que les flammes viennent à la rencontre l'une de l'autre, au lieu de s'échapper chacune directement en *a* après s'être formées en *bc*, que le gaz en venant

du générateur et l'air en s'échauffant acquièrent une certaine impulsion ; il faut, de plus, que le tirage de la chaudière soit réglé de façon à équilibrer cette impulsion au point qu'il reste un peu de pression moyenne dans le four. Si ces conditions sont remplies dans la mesure où elles sont indispensables à la bonne conduite de tout autre système de four à gaz, l'expérience acquise dans des installations transformées d'après le système des courants opposés a prouvé qu'on peut faire converger les deux flammes de deux points très éloignés entre eux, sans qu'il s'échappe de produits non brûlés, c'est-à-dire sans que chaque flamme forme un crochet entre son point d'introduction et l'ouverture voisine d'évacuation. Par contre, les deux flammes qui vont à la rencontre l'une de l'autre acquièrent déjà, à peu de distance de leur point de formation, une tendance à se développer en éventail, à tournoyer ensemble et à remplir la chambre de chauffe plus régulièrement et plus complètement qu'une flamme qui, passant dans un seul sens, se compose de zones parallèles inégalement échauffées, subsistant souvent dans toute la distance du parcours du point d'introduction à celui d'évacuation, ce qui fait que la plus grande partie de la chaleur se porte à la partie supérieure du four, où elle est nuisible, tandis que son effet serait utile à la partie inférieure.

Si le gaz et l'air entrent dans le four par deux ouvertures distinctes, leur combinaison chimique ne se fera qu'à une certaine distance et progressivement, de sorte que la flamme ne sera pas piquante ; le mélange intime n'en sera pas moins garanti par la rencontre des courants.

Les figures 22, 23, 24 montrent l'application des courants opposés à différents cas de la pratique. Elles repré-

sentent une coupe perpendiculaire au grand axe d'un four à bassin et une vue des brûleurs.

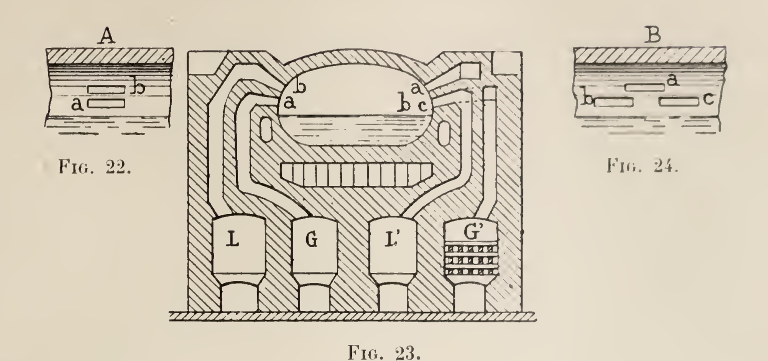


Fig. 22. Fig. 23. Fig. 24.

Le côté gauche de la figure et la projection A de gauche indiquent la disposition qui est généralement adoptée dans les fours Siemens, où le gaz et l'air sont réchauffés dans les régénérateurs.

Le côté droit et la projection B de droite représentent la disposition qui pourrait être adoptée pour donner au four une marche à courants opposés ; nous ajouterons que, dans ce cas, il n'y a pas de récupération pour le gaz; la marche du four est la suivante :

Le gaz entre à la fois des deux côtés en *a* ; c'est également des deux côtés qu'arrive l'air et que s'échappent les produits de la combustion, le premier entrant en *b* ou en *c*, les autres sortant par *c* ou *b*.

Les chambres G, qui, dans le dispositif Siemens, constituaient des régénérateurs à gaz, deviennent des régénérateurs à air, ces derniers étant ainsi au nombre de quatre.

Si, comme c'est souvent le cas, ils ont un cube restreint, ils offriront néanmoins, à eux deux, assez de surface pour échauffer l'air seul ; autrement il faudrait,

en modifiant l'embranchement des carneaux, faire agir pour l'entrée le régénérateur L à gauche avec G[1] à droite et inversement.

Il faut éviter que le gaz arrive trop froid au four. On cherchera à l'échauffer, s'il est possible, sous la sole de ce dernier.

Dans la disposition que nous venons d'indiquer, le gaz entre dans le four au-dessus de la nappe d'air. Cette position relative des ouvertures n'a pas d'importance au point de vue du mélange intime des gaz, puisque l'opposition des courants complète ce mélange, mais elle lui est plus favorable que nuisible, en ce sens que le gaz reste plus lourd que l'air qui arrive chauffé au four. Cela peut aussi avoir l'avantage d'empêcher que des veines de gaz non encore complètement brûlées n'arrivent au contact de la surface du verre fondu.

30. — Distribution du gaz et de l'air au moyen de cloches simples ou doubles remplaçant les valves. — Les fours Siemens ont tous été construits en admettant deux chambres de régénération pour le gaz et deux chambres à réchauffer l'air, fonctionnant alternativement.

Dans les cas où le tirage des gazogènes est assuré soit par une différence de niveau suffisante entre la grille des gazogènes et la sole du four, soit par l'admission d'air soufflé à la grille des gazogènes, l'emploi du siphon ou cooling-tube devient inutile et serait d'ailleurs irrationnel. Le gaz est conduit alors directement aux régénérateurs, et dans certains cas même directement au four.

On remarquera qu'au moment où — dans les fours à inversion des courants de flammes — la valve exécute son mouvement de rotation, le gaz est en communication

directe avec la cheminée. De plus, la chambre par laquelle arrivait le gaz au moment où on a commencé l'inversion est pleine de gaz qui va aussi être attiré à la cheminée. On perd donc, à chaque inversion, le contenu d'une chambre et, en outre, ce qui peut s'échapper de gaz pendant le mouvement de la valve. Ce gaz, rencontrant l'air qui par la même raison se rend à la cheminée, peut occasionner des détonations, si on n'a pas la précaution de conduire le gaz et l'air par deux canaux séparés se rejoignant le plus près possible du pied de la cheminée, et construits de telle sorte que les deux courants de gaz et d'air soient parallèles.

On éprouve souvent des difficultés résultant de l'encrassement de la valve à gaz par des dépôts de goudron mélangé de suie. Ces dépôts forment des saillies qui rendent l'obturation incomplète, d'où des fuites auxquelles il est parfois très difficile de remédier. Le gaz s'enflamme à l'endroit de la fuite, et la valve rougit ; les fontes se gondolent, mettant ainsi rapidement l'appareil hors d'usage.

En prévision de ces accidents, certaines verreries installent sur la même conduite à gaz deux valves de renversement, dont l'une est toujours prête à fonctionner si l'autre vient à faire défaut.

Il est entendu que la valve à air, constamment rafraîchie par l'air froid sur une de ses faces, ne présente aucun de ces inconvénients.

Dans quelques verreries, on remplace la valve à gaz par une cloche (*fig.* 25).

Dans cet appareil, la distribution se fait au moyen d'une cloison diamétrale de la cloche. Les fuites sont rendues impossibles à la condition, toujours facile à remplir, que la cloison du milieu soit bien étanche et que

l'eau coule continuellement dans les rigoles de fonte établies à cet effet.

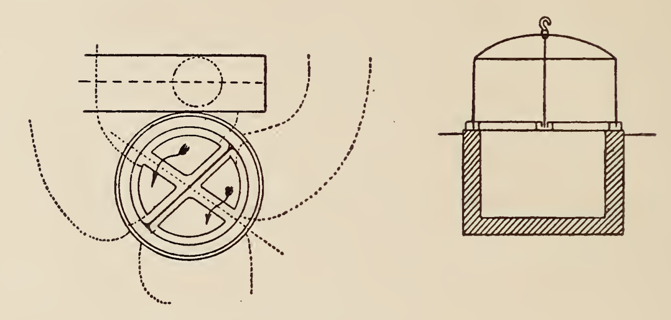


Fig. 25.

Le seul et grave défaut de cet appareil est de se prêter difficilement aux nettoyages. On peut aussi lui reprocher d'occasionner au courant de gaz une perte de charge beaucoup plus grande que ne le fait la valve. Un simple examen de la figure indiquant les mouvements des gaz donnera la raison de cette perte de charge accentuée.

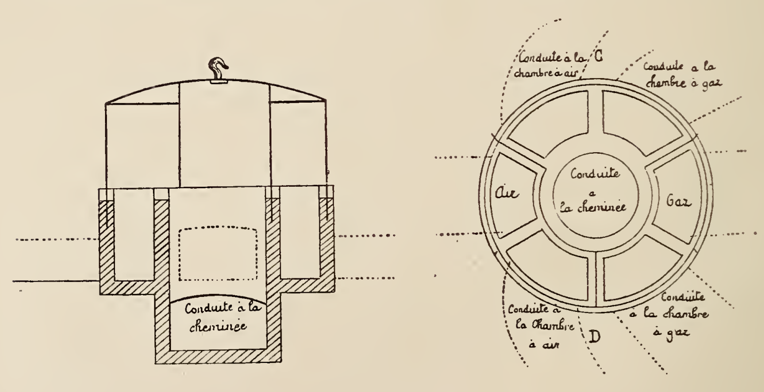


Fig. 26.

On a constaté que, toutes circonstances égales d'ailleurs, un four muni de cloche a une allure moins chaude que le même four muni d'une valve.

Dans le même ordre d'idées, on a imaginé une cloche double, qui, par un simple mouvement de 180° autour de son axe, distribue en même temps le gaz et l'air. Cet appareil (*fig.* 26) a reçu quelques applications qui subsistent, malgré l'inconvénient qu'on éprouve pour les nettoyages, et la perte de charge à laquelle il donne lieu.

31. — Des diverses formes de régénérateurs. — Afin d'éviter les inconvénients dont nous avons parlé plus haut : perte de gaz à chaque renversement, fonctionnement plus ou moins régulier des valves, un certain nombre de constructeurs ont supprimé la régénération du gaz.

Dans ce cas, on construit les gazogènes dans le voisinage immédiat des fours, ce qui permet d'utiliser la presque totalité de la chaleur que possèdent les gaz à leur sortie des gazogènes, et de tirer parti des goudrons qu'ils entraînent et dont la présence, au lieu d'être une gêne, donne au gaz un accroissement notable de puissance calorifique.

Il n'y a de récupération que pour l'air, qui s'échauffe en montant à l'entour de carneaux en poterie, dans l'intérieur desquels circulent les produits de la combustion avant de s'échapper à la cheminée.

C'est généralement le mode de construction qui a été adopté pour les régénérateurs à air. Le problème à résoudre pour assurer une bonne régénération consiste à éviter les deux écueils ci-dessous :

1° Faire que les parois séparant l'air à chauffer des gaz chauds sortant du four soient de forte épaisseur et par suite bien étanches et de longue durée. Dans ce cas, le régénérateur dure longtemps, mais l'air se chauffe

mal, le four ne va pas, la combustion se fait d'une façon défectueuse;

2° Faire une paroi mince, ce qui assure une bonne régénération de l'air, au détriment de la bonne conservation du régénérateur; les parois se trouent, fondent même quelquefois, ce qui oblige à de fréquentes réparations.

Tous les inventeurs, MM. Radot, Lencauchez, Pernot, Ponsard, Charneau, etc., se sont ingéniés à faire tenir la plus grande surface de chauffe possible dans le plus petit volume. Il fut même construit à Anzin un récupérateur (Mantrant) consistant en tubes de fonte que devaient entourer les gaz sortant du four et qui étaient traversés par l'air à chauffer. Il est inutile d'insister sur les causes qui mirent en quelques heures ce récupérateur absolument hors d'usage.

Nous donnerons la description de ceux de ces appareils qui ont donné de bons résultats.

La figure 27 représente le four Radot et Lencauchez, dans lequel le gaz arrive par un tuyau G au-dessus du four, se répartit vers les deux têtes de la chambre de chauffe, et y rencontre dans deux brûleurs l'air qui, de son côté, est entré en F et s'est échauffé en montant dans le récupérateur avant de se répartir dans les deux brûleurs.

Les produits de combustion s'échappent verticalement par le pied des piliers du four, et de là dans le récupérateur qu'ils parcourent horizontalement en l'échauffant avant de s'échapper par F dans la cheminée. Ce genre de distribution de flammes n'exclut pas le parallélisme des zones de chaleur qui entourent les pots. L'opposition des courants s'arrête à son début, et cette disposition en outre ne permet pas le renversement du courant de l'air.

Elle donne néanmoins de bons résultats dans des fours dont les dimensions ne sont pas exagérées ; il y a toutefois à y blâmer la position du canal à gaz au-dessus du four, d'où résulte un refroidissement, au lieu d'un chauffement du gaz combustible au contact des parois du four, qui demandent à être refroidies.

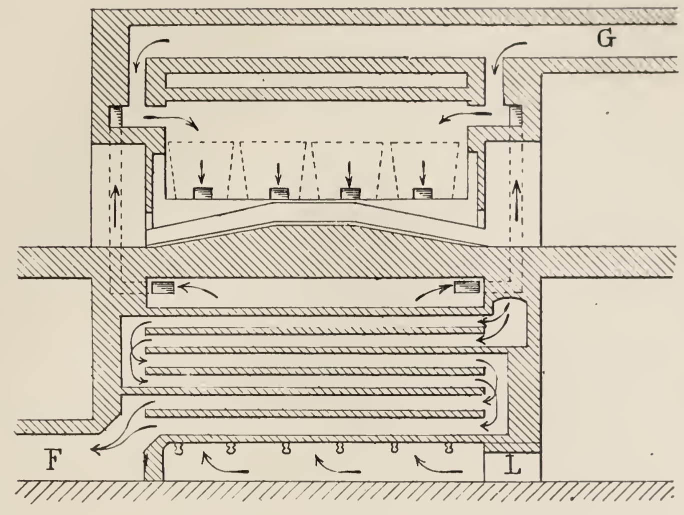


Fig. 27.

Ces récupérateurs occupent peu de place sous les fours, et cela à cause de la suppression du renversement des courants gazeux, ce qui présente certains avantages au point de vue de l'économie de construction et au point de vue du travail plus régulier du verre à l'intérieur des fours chauffés de cette manière.

Cette continuité ou plutôt cette uniformité dans l'arrivée du courant gazeux présente l'avantage de chauffer toujours régulièrement tous les creusets par une flamme également répartie, elle supprime les chances d'inégalités de température entre les deux extrémités d'un même

four, irrégularités résultant quelquefois d'un changement de direction des gaz, en des temps inégaux, par suite d'une négligence d'ouvrier. Elle présente encore d'autres avantages au point de vue du travail du verre aux ouvreaux, pour le soufflage.

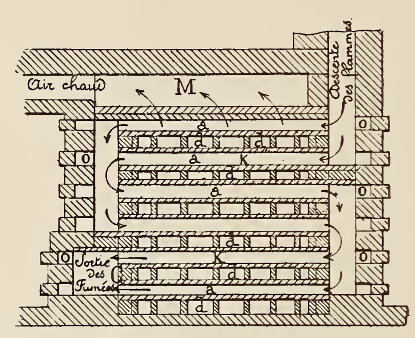


Fig. 28.

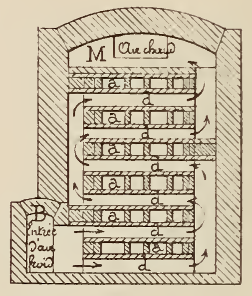


Fig. 29.

Les figures 28, 29, donnent la disposition adoptée par M. Charneau. On voit que le régénérateur se compose d'une série de petits conduits *aa*, parallèles, construits avec des briques de dimensions courantes, dans lesquels passent les flammes perdues du four, qui circulent, tout en descendant, dans la masse de briques pour aller rejoindre la cheminée d'appel par le carneau c.

L'air à chauffer entre par le conduit B placé sur une des faces de la chambre de briques, pour pénétrer dans l'appareil par une série de petits conduits parallèles, horizontaux, *ddd*, construits perpendiculairement sur ceux du passage des flammes. Il monte, en s'échauffant, pour gagner la chambre d'air chaud M et de là se rendre aux brûleurs, par un ou plusieurs conduits, suivant les nécessités.

On voit, par l'examen des figures, que chaque tranche d'air est enveloppée par deux tranches de flammes, et réciproquement.

La séparation des flammes et de l'air à chauffer est faite par un carrelage établi au moyen de petits carreaux K à recouvrement, ou avec des briques ordinaires. En raison de la disposition des petits conduits, qui sont construits perpendiculairement les uns sur les autres, les joints sont complètement étanches, puisqu'ils sont couverts dans tous les sens par une épaisseur de briques pleines ; il est donc matériellement impossible qu'il y ait communication entre les tranches de flammes et les tranches d'air à chauffer.

Nous pouvons dire que c'est un des rares appareils qui, malgré sa simplicité, offre cet avantage.

Le poids de la masse de briques est suffisant pour assurer une stabilité parfaite. De plus, tous les conduits sont prolongés jusqu'à la rencontre des murs de la chambre, formant ainsi une série de murettes verticales, qui viennent buter sur les quatre pans du massif de briques et empêcher toute espèce de dislocation.

Des regards *ooo* sont ménagés dans les murs de fermeture de l'accumulateur, de façon à pouvoir vérifier son état et nettoyer les poussières ou dépôts qui auraient pu s'arrêter dans les conduits de fumée. Le nettoyage peut se faire sans inconvénient pendant la marche du four.

M. Nehse a également construit un four dans lequel les gazogènes sont directement reliés au four sans l'intermédiaire du siphon. Les gaz sont produits dans les gazogènes à une température très élevée, ce qui prévient en quelque sorte la formation des hydrocarbures lourds.

Il n'y a pas de renversement pour l'air ; les courants gazeux ont une direction constante et arrivent au four par un grand nombre d'orifices. Cette disposition présente l'avantage d'une construction simple, mais il ne paraît

pas qu'elle ait donné de meilleurs résultats que le four Siemens.

32. — Four rond à colonne centrale, système de Boismontbrun, chauffé au gaz avec récupérateur Radot et Lencauchez. — Dans ce système de four (*fig.* 30) appliqué chez M. de Boismontbrun,

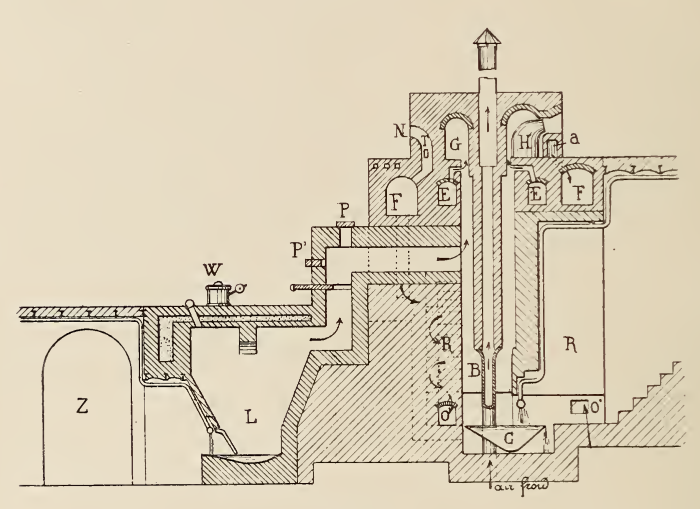


Fig. 30.

Z, galerie de travail longeant la batterie de gazogènes.
PP', regards pour nettoyages.
EE, carneaux d'introduction au four de l'air qui s'est échauffé dans le récupérateur.
FF, carneaux de sortie des gaz brûlés d'où ils s'introduisent dans le récupérateur.
C, bâche à eau recevant le verre qui s'écoule par débordement des creusets H.
O, sortie des gaz brûlés qui s'échappent au pied des récupérateurs.
O', prise d'air qui, après s'être échauffé dans le récupérateur, passe par E pour entrer au four autour de la colonne centrale.

maître de verrerie à Coudrecieux, et appliqué pour les pots découverts à la Pierre (Sarthe), et à Grande-Vallée (Seine-Inférieure), les gaz arrivent sur la sole du four par une section annulaire ménagée autour d'une colonne établie au centre du four et remplissant le vide laissé en ce point

par les creusets. Avant leur arrivée à la sole du four, les gaz rencontrent l'air chaud venant du récupérateur. Les produits de la combustion s'élèvent donc, entourant les creusets et sortent par chacun des piédroits, d'où ils se réunissent dans un collecteur qui les amène au récupérateur à air.

La colonne centrale est creuse et constamment rafraîchie par un courant d'air, qu'on peut toujours utiliser pour le chauffage de certaines parties de l'usine.

Si un pot vient à se briser, soit par suite d'un accident, soit par suite d'usure, le verre qui se répand sur le siège n'y séjourne pas. Il s'écoule, liquide, dans la section annulaire par où débouchent les flammes; ne pouvant s'attacher aux parois dans lesquelles ont été ménagées des retraites à cet effet, il tombe verticalement dans le vide ménagé autour de la colonne, pour être reçu, généralement, dans une bâche à eau fermée par un joint hydraulique, d'où on peut aisément le retirer sans donner accès à l'air. Le verre, s'écoulant ainsi, n'a pas eu le temps de se souiller au contact des matériaux constituant la sole du four; il constitue un excellent groisil qu'on peut utiliser presque sans nettoyage.

33. — Four rond à brûleur central. — L'inconvénient de ces fours à colonne centrale, c'est la grande profondeur à laquelle ils obligent de placer les gazogènes, ainsi que l'usure rapide des brûleurs.

A cause de ces inconvénients, nous préférons de beaucoup le four à brûleur central placé à la voûte (*fig.* 31). L'expérience acquise dans les fours de verre à vitres de M. Renard a démontré qu'il n'y avait aucune inquiétude à avoir au sujet de la construction du brûleur, non plus que sur la qualité des produits fabriqués. On avait craint,

en effet, que le gaz venant frapper la surface des creusets n'exerçât une pression suffisante pour paralyser l'ébullition, l'affinage du verre. Il n'en est rien, car cette pression n'est surtout prononcée qu'à l'endroit même où arrivent les gaz, c'est-à-dire dans l'espace vide, non occupé par les creusets.

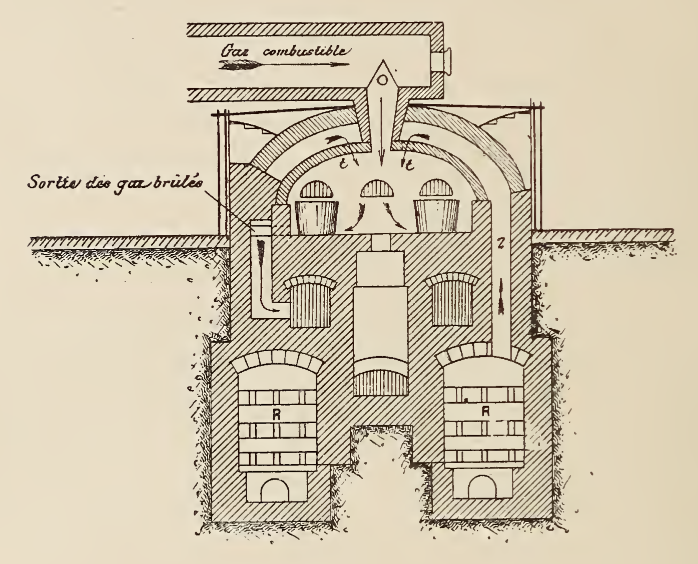


Fig. 31.

tt, orifice d'introduction de l'air chaud comburant.
O, orifice d'introduction du gaz combustible.

Dans ce four, on voit que la combustion des gaz s'opère à la voûte où est amené l'air chaud.

Cet air chaud, produit dans un ou deux récupérateurs, se rend au brûleur en montant dans un des piédroits et en passant entre les deux voûtes superposées qui recouvrent le four. Il pénètre ensuite dans le conduit amenant le gaz combustible, par une série d'orifices convenablement disposés qui assurent un mélange parfait du gaz et de l'air.

La flamme pénètre dans le four proprement dit, sans frapper les creusets, et s'étale sur la sole en les enveloppant. Les produits de la combustion s'échappent derrière les creusets et regagnent les galeries du récupérateur par les piédroits non employés au passage de l'air chaud.

34. — Four Siemens modifié. Régénération du carbone. — MM. Biedermann et Harvez, appartenant au personnel technique de la maison Siemens, ont pensé que les fours à chaleur régénérée étaient susceptibles de perfectionnements et pourraient encore procurer une économie considérable de combustible en modifiant légèrement le mode de récupération, et en faisant intervenir directement une partie des produits de la combustion à leur sortie du laboratoire, dans la gazéification du combustible solide.

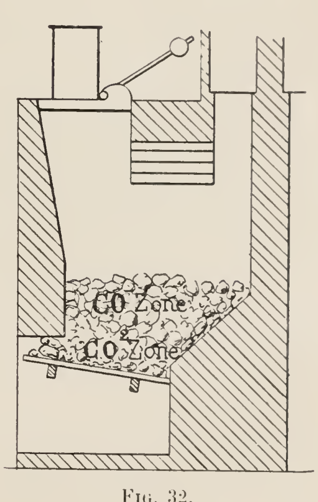


Fig. 32.

On sait que dans le gazogène ordinaire la production de l'oxyde de carbone est le résultat de la décomposition de l'acide carbonique formé en premier lieu sur la grille par l'oxygène en excès.

Dans la couche inférieure du combustible incandescent (*fig.* 32) il se produit de l'acide carbonique surchauffé qui se transforme en oxyde de carbone en traversant la couche supérieure rouge, tandis que les hydrocarbures distillent à la surface et quittent le gazogène mélangés à l'oxyde de carbone.

La formation de l'acide carbonique donne lieu à une

forte production de chaleur, mais sa transformation en oxyde de carbone est, au contraire, accompagnée d'une absorption de calorique.

Dans le four Siemens adapté à la réalisation de ce principe nouveau, les produits de la combustion tels qu'ils sont à la sortie du laboratoire, c'est-à-dire très chauds, sont introduits directement sous la grille du gazogène. Il en résulte qu'on peut se dispenser de produire de l'acide carbonique dans la partie inférieure du nouveau gazogène.

Il suffit que la chaleur qui eût été engendrée par cette production d'acide carbonique et qui est nécessaire à sa décomposition, soit compensée par le calorique apporté par les produits de la combustion jouant ici le rôle de comburant.

S'il en est ainsi, le gazogène deviendra le convertisseur dans lequel s'opèrera la reconstitution des gaz brûlés en gaz combustibles, sans que la température du combustible solide diminue. Ce fait, qui à première vue peut paraître paradoxal, s'explique par la présence dans le gaz brûlé d'une quantité considérable d'azote, qui est le véhicule de la chaleur nécessaire à la réaction.

On peut, par un raisonnement très simple, montrer en quelque sorte la raison première de l'économie réalisée. Supposons en effet le gazogène de la figure 32 rempli de coke incandescent ; si on admet de l'oxygène sous la grille, il se formera dans la zone inférieure de l'acide carbonique produisant une certaine quantité de chaleur. Cet acide carbonique se décomposera dans la zone supérieure, en absorbant une partie de cette chaleur.

Il résulte de la réaction que le poids du carbone gazéifié dans la zone inférieure sera égal à celui du carbone gazéifié dans la zone supérieure. Mais, si nous supprimons

la production d'acide carbonique et que nous le remplacions par de l'acide carbonique surchauffé, emprunté à une source étrangère, nous aurons bien réalisé l'économie de la moitié du combustible.

Dans le nouveau four, les gaz sortant du laboratoire sont en partie dirigés sous la grille du gazogène convertisseur, et leur chaleur est intégralement utilisée soit pour opérer la distillation des matières volatiles de la houille, soit pour les maintenir à une certaine température à leur arrivée dans le four. L'autre partie des gaz brûlés descend dans le régénérateur de l'air comme dans le four Siemens ordinaire.

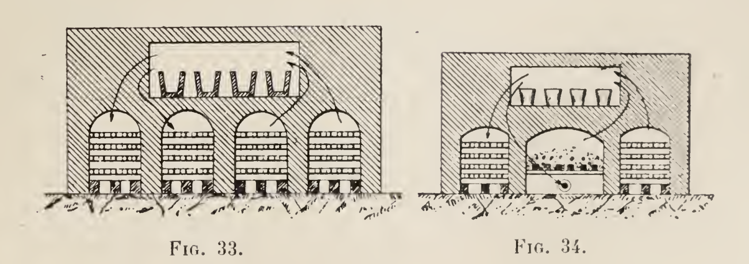


Fig. 33. Fig. 34.

Pour la propulsion des gaz à travers le convertisseur, on emploie un injecteur de vapeur. Cette vapeur est surchauffée par les gaz venant du four, elle est décomposée en traversant le convertisseur et sert à enrichir les gaz.

Les figures 33 et 34 permettent de saisir les analogies qui existent entre le nouveau et l'ancien four Siemens. Le four ancien (*fig.* 33) possède deux régénérateurs : un pour le gaz, un pour l'air ; le nouveau (*fig.* 34) ne possède qu'un régénérateur d'air et un convertisseur pour le gaz. Dans les deux cas, on refroidit également les gaz brûlés avant leur départ par la cheminée en ne laissant que la chaleur nécessaire au tirage ; mais comme, dans le nouveau four, une partie seulement des gaz brûlés est

à évacuer, la chaleur nécessaire au tirage de la cheminée se trouve diminuée d'autant. Dans les deux fours, il y a inversement des courants d'air et de gaz pour assurer la répartition uniforme de la température dans le four.

La forme adoptée pour le nouveau four peut varier selon les circonstances. Celle qui est représentée par les figures 35 et 36 est adaptée à la fabrication du verre dans un four à bassin dans lequel la flamme circule en décrivant un demi-cercle. A est un des régénérateurs à renversement pour l'air; B le gazogène établi sur lesdits régénérateurs; FF′, trémies de chargement du combustible; NN′ grilles du gazogène; E, laboratoire du four, est à côté du gazogène et repose sur une fosse L; C est un des conduits amenant le gaz combustible au laboratoire E; DD′ valves à champignons, conjuguées entre elles par un balancier, de manière à ouvrir ou à fermer alternativement l'une ou l'autre conduite à gaz; *hg*, *h′g′*, brûleurs à flamme libre débouchant dans le laboratoire; HH′, bouches d'air chaud communiquant avec le laboratoire; KK′, conduite reliant les régénérateurs aux brûleurs; I, un des injecteurs à vapeur placés dans les carneaux et produisant l'appel d'une partie des gaz brûlés sous les grilles du gazogène convertisseur; J, valve pour produire l'inversion du courant d'air allant au four, et des gaz brûlés passant par les régénérateurs pour se rendre à la cheminée; O, un des couvercles montés sur charnières pour admettre ou intercepter alternativement les gaz brûlés dans leur communication avec le gazogène. Ces couvercles sont manœuvrés automatiquement par des tringles reliées au balancier des champignons DD′, le mouvement qui ferme D′ ouvrant O et *vice versa*.

Des portes QQ donnent accès aux grilles du convertisseur pour le nettoyage.

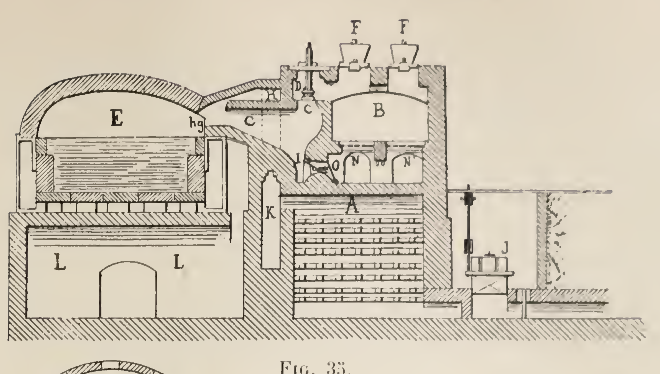


Fig. 35.

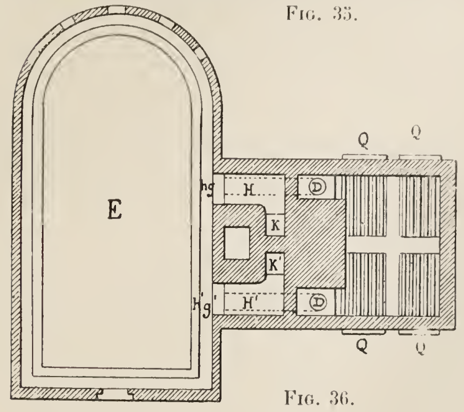


Fig. 36.

A, régénérateur à renversement pour l'air.
B, gazogène.
FF', trémies de chargement.
NN', grilles du gazogène.
E, laboratoire du four.
C, un des conduits amenant le gaz combustible au laboratoire E.
DD', valves à champignons conjuguées entre elles par un balancier de manière à ouvrir ou à fermer alternativement l'une ou l'autre conduite à gaz.
hg, *h'g'*, brûleurs à flamme libre débouchant dans le laboratoire.
HH' bouches d'air chaud communiquant avec le laboratoire.
KK' conduite reliant les régénérateurs aux brûleurs.
I. un des injecteurs à vapeur placé dans les carneaux et produisant l'appel d'une partie des gaz brûlés sous les grilles du gazogène convertisseur.
J, valve pour produire l'inversion du courant d'air allant au four et des gaz brûlés passant par les régénérateurs pour se rendre à la cheminée.
O, un des couvercles montés sur charnière pour admettre ou intercepter alternativement les gaz brûlés dans leur communication avec le gazogène. Ces couvercles sont manœuvrés automatiquement par des tringles reliées au balancier des champignons DD', le mouvement qui ferme D' ouvrant O et *vice versa*.
Q, Q, portes d'accès aux grilles du gazogène.

Voici maintenant quel est le fonctionnement du four :

Le gaz du convertisseur B passe par un des carneaux C et le champignon D′ au brûleur *h′g′*. Il rencontre l'air amené par la bouche H′ et s'enflamme.

Les produits de la combustion s'échappent par le second brûleur *hg*, pour se diriger partie vers la cheminée en passant par le régénérateur A, partie sous les grilles NN du gazogène par l'injecteur I pour y être reconstitués en gaz combustible. De temps en temps on renverse la direction des courants en manœuvrant les champignons DD′ et la valve J, comme on le fait habituellement dans les fours Siemens.

Les gaz fournis par le convertisseur ont la composition moyenne ci-dessous, que nous comparons à celle des gaz produits par l'ancien gazogène :

	Ancien gazogène	Gazogène convertisseur
Acide carbonique......	3,8	4,0
Oxygène	0,0	0,0
Oxyde de carbone	26,1	27,0
Hydrogène............	1,0	8,0
Hydrogène carboné....	2,8	4,0
Azote	61,3	57,0
	100,0	100,0

Ces gaz, quoique de composition bien différente, différence due en partie à la nature de la houille employée dans les deux cas, ont sensiblement la même puissance calorifique ; mais il était intéressant de constater que la proportion d'acide carbonique n'est pas beaucoup plus considérable dans le cas du gazogène convertisseur que dans les gaz obtenus directement par l'air dans les gazogènes de l'ancien four Siemens.

Outre l'avantage que présente le nouveau four, en rai-

son de l'économie de combustible qu'il permet de réaliser, il convient d'attirer l'attention sur l'extrême simplicité de construction de cet appareil. Le prix de revient, d'après les inventeurs, n'est environ que les deux cinquièmes de celui d'un ancien four Siemens de même capacité productive. L'emplacement occupé par le nouveau four est extrêmement restreint, la main-d'œuvre se trouve aussi simplifiée et diminuée, le service du gazogène étant réduit dans la même proportion que la consommation du combustible.

Dans une note de M. G. Despret, relative aux perfectionnements apportés aux gazogènes et fours Siemens, nous trouvons que le fonctionnement d'un four, avec régénération d'une partie des gaz brûlés, est assuré en utilisant 56,5 0/0 des gaz brûlés à l'échauffement du régénérateur à air; le reste, 43,5 0/0 étant largement suffisant pour fournir par son passage dans les gazogènes convertisseurs un gaz combustible de richesse constante. L'économie chiffrable serait évaluée à 50 0/0. Ce perfectionnement, qui fait du gazogène Siemens un véritable convertisseur, présente pour les industries métallurgiques et verrières un intérêt capital; aussi nombre de personnes fort compétentes en la matière ont-elles cherché à se rendre compte si réellement ce mode d'opérer est susceptible d'application et s'il peut donner les résultats annoncés.

Nous citerons quelques passages d'une étude très consciencieuse qui a été faite à ce sujet par M. Émile Fourcault, ingénieur des mines à Lodelinsart[1], et à laquelle nous engageons vivement le lecteur à se reporter.

[1] *Étude sur les gazogènes à injection de produits de combustion.* Voir *Revue universelle des Mines*, 3e série, t. X.

« La modification faite par MM. Biedermann et Harvez revient à transformer les générateurs de gaz en véritables convertisseurs dans lesquels les produits brûlés, riches en acide carbonique et en vapeur d'eau, se transforment de nouveau en oxyde de carbone et hydrogène, reproduction fidèle de la classique expérience de laboratoire ayant pour objet la production de l'oxyde de carbone en faisant passer un courant d'acide carbonique dans un tube rempli de charbon de bois et porté au rouge.

« A première vue, le processus indiqué paraît fort simple et si rationnel qu'il serait étrange que tant d'intelligences au service des questions de chauffage ne l'aient fait surgir plus tôt de l'immense trésor que les sciences mettent à la disposition de tous les chercheurs.

« Dix ans auparavant, à Paris, le 20 avril 1879, et à Charleroi le 9 mai de la même année, deux demandes de brevet ont été déposées par M. Émile Gobbe, ingénieur de l'École centrale de Paris.

« Ces documents avaient pour objet identiquement le même principe de la régénération du combustible. On y lit : « Le principe de cette invention repose sur la pro-
« priété qu'ont les produits de combustion de pouvoir
« être régénérés, c'est-à-dire redevenir gaz combustibles
« en passant sur une couche de coke maintenue à une
« température suffisamment élevée.

« Or, dans les fours à haute température, les gaz brûlés,
« après avoir produit leur effet utile dans le laboratoire du
« four s'échappent à une température relativement très
« élevée et la chaleur, qui se trouve pour ainsi dire dis-
« soute dans ces produits de combustion, est suffisante pour
« porter au rouge une masse de combustible qui se trou-
« verait à proximité du laboratoire et, par suite, régéné-
« rer le gaz brûlé qui aura traversé cette couche. »

« Si donc nous plaçons près du laboratoire d'un four « à haute température un gazogène étudié de telle façon « que les produits de combustion venant du laboratoire « puissent facilement traverser la couche de charbon qui « y serait renfermée, nous aurions ainsi un appareil qui « pourra régénérer le gaz ; c'est pourquoi je l'appelle « gazogène régénérateur.

« Le gaz ainsi régénéré pourra servir à tel usage que « l'on jugera convenable, et même on pourra de nouveau « l'employer dans le laboratoire du four d'où il vient de « sortir et le régénérer indéfiniment.

« Mais, comme son volume irait toujours en augmen- « tant, il serait alors nécessaire d'en laisser échapper « une partie sans la faire passer au travers du gazogène « régénérateur. On pourrait, par exemple, employer cette « partie des produits de combustion au chauffage de « l'air de combustion, et cela à l'aide des chambres de « chaleur Siemens, Ponsard, etc. »

« Suit alors la description d'un four de verrerie dans lequel le passage des gaz brûlés au travers du combustible est réalisé par l'action d'une grande cheminée-siphon.

« Un tel four a été construit chez MM. Lemaire frères, maîtres de verrerie, à Aniche (Nord). L'installation a marché pendant trois semaines en donnant une sérieuse économie de combustible.

« L'obstruction continuelle du siphon a conduit les expérimentateurs à abandonner leurs essais ; une modification de la canalisation eût pu facilement porter remède à cet état de choses.

« L'inventeur conclut en ces termes :

« En résumé, je revendique dans cette invention le « droit exclusif de régénérer les produits de combustion

« des fours à haute température en les faisant passer au « travers d'un foyer de forme quelconque placé à proxi- « mité du laboratoire du four à haute température. »

« Cette idée peut-elle être féconde en résultats ? Et dans l'affirmative quel en serait le mode d'application le plus rationnel ?

« Telles sont les questions que nous nous sommes posées et que nous avons tâché de résoudre par le calcul, en nous appuyant sur les lois de la thermo-chimie, les données expérimentales sérieuses faisant encore totalement défaut.

« Siemens, dans ses brochures, annonce une économie de 66 0/0 dans la consommation de combustible.

« L'on peut affirmer *a priori* que ce chiffre est singulièrement exagéré. En effet, que peut-on gagner sur le système ancien ?

« 1° En admettant qu'il soit possible d'introduire dans le gazogène la totalité des produits affectés, dans le système ordinaire, au chauffage des empilages à gaz, nous sommes en état de regagner toute la perte due à l'excès de température à la sortie de ces chambres, soit 13,89 0/0.

« 2° Une seconde économie réalisable est due à *l'utilisation de la chaleur latente de vaporisation du carbone*, dépense qui serait faite une fois pour toutes pour la quantité régénérée.

« Déterminons quel est le maximum de la quantité de carbone régénérable.

« Un kilogramme de carbone pur donne théoriquement le gaz suivant :

2,333 kg CO + 4,437 kg Azote.

« Ce gaz brûlant avec la quantité d'air théorique four-

nit les produits de combustion suivants :

$$3 \text{ kg } 667 \; CO^2 + 8{,}874 \text{ kg Azote.}$$

« Les gaz brûlés obtenus dans ces conditions contiendront exactement la quantité d'oxygène nécessaire pour reformer le gaz primitif.

« Si donc nous pouvons faire passer la totalité de ces produits dans le gazogène, la quantité de carbone régénérée sera de 100 0/0, c'est-à-dire de 1 kilogramme, et le gaz formé aura identiquement la même composition bue le gaz initial.

« En pratique, il faut un excès d'air minimum de 20 0/0 pour obtenir une combustion complète.

« Les produits de combustion de gaz au coke théorique seront donc dans ces conditions :

Produits de combustion, avec 20 0/0 *d'excès d'air, du gaz au coke théorique*

	POIDS DE GAZ BRULÉS FORMÉS	COMPOSITION CENTÉSIMALE	CALORIQUE SPÉCIFIQUE	CALORIQUE SPÉCIFIQUE DU KG DE GAZ
CO^2 ...	3,6667	0,2665	0,217	0,0578305
Az.....	9,8208	0,7141	0,244	0,1742404
O	0,2666	0,0194	0,217	0,0042098
	13,7541	1,0000	0,236	0,2362807

« L'oxygène disponible dans ces gaz brûlés pour la formation d'oxyde de carbone se compose :

« 1° De la moitié de O uni à C ;

« 2° De la totalité de l'oxygène libre.

« Il y a par conséquent de disponible dans 1 kilo-

gramme de produits de combustion :

$$\frac{3.6667 \times 4}{13.7541 \times 11} + \frac{0.2665}{13.7541} = \frac{17.60}{13.7541 \times 11} \text{ kg Oxygène}$$

« On sait que, pour transformer 1 kilogramme de carbone en CO, il faut 4/3 kilogramme d'oxygène.

« Il faudra donc un nombre n kilogrammes de produits de combustion pour effectuer cette transformation, nombre donné par :

$$n = \frac{4 \times 13.7541 \times 11}{3 \times 17.60}$$

« Or 13.7541 kilogrammes de gaz brûlés contiennent 1 kilogramme de carbone ; les n kilogrammes que nous devons introduire en contiendront x, donnés par la relation :

$$x = \frac{4 \times 1375.41 \times 11}{3 \times 17.60 \times 13.7541} = 0{,}8333 \text{ Carbone}$$

« On peut donc, la combustion se faisant avec 20 0/0 d'air en excès, régénérer au maximum 83,3 0/0 de la quantité de carbone contenue dans le combustible, si, bien entendu, la quantité non employée de produits brûlés, après avoir assuré le chauffage de l'air, contient suffisamment d'oxygène disponible pour assurer la gazéification complète du combustible.

« Le bénéfice maximum de ce chef est trouvé égal à $0{,}7121 \times 0{,}833 = 0{,}4934$ carbone.

« Le carbone des hydrocarbures étant déjà à l'état gazeux n'entre pas en ligne de compte.

« Or la chaleur latente de vaporisation du carbone étant

estimée à 3 134 calories, nous bénéficions de :

$$0,5934 \times 3134 = 1860 \text{ Cal.}$$

$$\text{Soit } \frac{186000}{7725} = 24,08\ 0/0$$

« En résumé, et sans examen plus approfondi, on peut réaliser :

1° Gain sur la perte de tirage aux chambres à gaz...	13,89 0/0
2° Gain sur la chaleur latente de vaporisation du carbone..........	24,08 0/0
Gain total..........	37,97 0/0

« En lisant le brevet pris par Siemens, on peut se demander si l'introduction de gaz brûlés au moyen d'un koerting à vapeur est bien le moyen le plus rationnel d'obtenir la régénération du carbone et l'utilisation de la chaleur latente de vaporisation de celui-ci.

« Un doute se présente immédiatement à l'esprit. La concentration successive de la vapeur d'eau dans les gaz brûlés, combinée au minime rendement du koerting aspirant des fluides aussi dilatés, n'assignera-t-elle pas à la vapeur un rôle prédominant dans les échanges de chaleur au cours de la gazéification ? Cette circonstance ne reléguera-t-elle pas au second plan la réaction essentielle de la régénération du carbone ? »

Poursuivant son étude et examinant les différents modes de procéder à la régénération du carbone : injection au moyen d'un jet de vapeur ou d'un jet d'air d'une partie des gaz brûlés supposés à très haute température, ou au contraire refroidis vers 3 000, M. Fourcault en arrive à conclure de la façon suivante :

« Siemens a précisément choisi, pour faire valoir son

idée de la récupération du calorique latent de vaporisation du carbone, le mode d'application le plus désavantageux de tous. Lui, le créateur de la récupération de la chaleur perdue par les produits de la combustion, propose la suppression des empilages à gaz pour permettre l'introduction dans le gazogène de 6 0/0 seulement de la quantité totale des gaz brûlés et aboutir finalement à une perte de 1 0/0 relativement au procédé ancien.

« Il n'est pas téméraire d'affirmer que les industriels qui emploieront le nouvel appareil n'en retireront absolument aucune économie.

« On a cependant cité des résultats brillants obtenus en métallurgie. Nous sommes persuadés que ceux-ci sont dus uniquement à l'application du chauffage par le gaz, aux qualités chimiques spéciales des flammes produites et à une disposition plus rationnelle des fours.

« Le dispositif Siemens est loin d'être pratique. La proximité des organes de renversement, tant du brûleur que du gazogène, aura pour effet de soumettre ceux-ci aux plus rudes épreuves : déformation et même fusion des valves.

« Les appareils d'injection résisteront-ils à des températures voisines de 1 500°. Il est permis de ne guère y croire. La substitution d'ajutages en matériaux réfractaires aux ajutages métalliques ne pourra jamais être qu'un faible palliatif.

« L'injection des gaz brûlés par l'intermédiaire de la vapeur n'est possible que par l'addition d'une très forte quantité d'air.

« Si cependant, pour des causes spéciales, l'emploi de la vapeur comme moteur d'aspiration s'imposait, il faudrait n'introduire les produits brûlés qu'après leur circulation dans les chambres à gaz. Il faut bien se garder de

supprimer ces appareils. L'économie possible reste, en effet, la même, et l'on a l'avantage de soustraire les appareils d'insufflation et d'inversion aux néfastes influences des hautes températures.

« Dans certains cas, l'espace peut faire défaut et amener forcément la suppression des chambres à gaz. Dans ce cas, il faudra que les chambres à air soient suffisamment grandes et puissantes pour pouvoir en distraire une partie de l'air qui y est chauffé afin de l'introduire sous les grilles, moyen détourné de tirer parti de l'excès de chaleur perdue qu'on est obligé d'y faire passer.

« La véritable manière d'arriver à une régénération sérieuse du carbone est d'employer un koerting à air comprimé ; c'est la seule solution rationnelle du problème, avec des aspirateurs agissant par entraînement moléculaire.

« Malheureusement le coût de l'air comprimé est très élevé ; en tenant compte du rendement du compresseur, on ne peut espérer qu'une économie de 7 0/0.

« Les usines disposant de force motrice perdue pourraient escompter un bénéfice de 18 0/0 sur la consommation de combustible.

« Quant aux avantages pratiques de ce mode d'application, ils sont tout indiqués.

« N'est-ce pas une solution facile du problème de la conservation des ajutages de la soufflerie que d'y lancer un jet d'air comprimé qui, en se détendant brusquement, réalise dans leur voisinage un abaissement considérable de température ?

« Dans le procédé présent, qui permet d'injecter 25 0/0 de gaz brûlés, nous pourrions songer à supprimer les récupérateurs à gaz, sans encourir des pertes bien considérables.

« Nous sommes d'avis qu'il serait utile, dans ce cas, de les remplacer par un nouvel organe auquel on pourrait donner le nom d'*épurateur*.

« Supposons que le canal qui amène les produits brûlés au koerting, et qui après inversion sert de conduit pour le gaz, soit large et coupé par des cloisons horizontales assez rapprochées, disposées comme dans le four Michel Perret pour le grillage des minerais. Que se passera-t-il si nous étalons sur ces surfaces de gros morceaux de coke léger ?

« Pendant la première phase, celle du courant ascendant, le gaz circulera dans ces chicanes, l'acide carbonique pourra achever sa réduction au contact du carbone incandescent.

« Pendant la seconde phase, celle du courant descendant, l'oxygène en excès des gaz brûlés pourra se fixer sur le carbone et une réduction du CO^2 pourra déjà se produire. En tous cas, il est fort probable que le fluide aspiré arrivera plus chaud aux générateurs de gaz.

« L'expérience seule décidera de l'efficacité de ce nouvel engin.

« Il est reconnu que, pour obtenir une bonne récupération des flammes perdues, il est avantageux de refroidir les gaz pendant leur formation aux gazogènes, afin de les introduire à une plus basse température dans les empilages.

« Ce résultat a été atteint utilement jusqu'à présent par l'introduction de vapeur d'eau dans la masse du combustible en ignition, et nous soutenons qu'il est plus rationnel de réaliser ce refroidissement par l'introduction de l'acide carbonique des gaz brûlés que de toute autre manière, car on peut de la sorte récupérer une partie de la chaleur latente de vaporisation du carbone.

« Cette dépense de force, ou mieux de chaleur, sera faite

ainsi une fois pour toutes pour la partie du carbone qu'on régénérera.

« Tous les efforts doivent tendre à réaliser économiquement, dans des conditions réellement pratiques, cette idée émise par M. Gobbe et ensuite par MM. Biedermann et Harvez, à savoir l'introduction dans les gazogènes des produits de combustion à la plus haute température possible. »

Nous pensons, comme M. Fourcault, qu'on pourra trouver grand avantage à opérer une récupération partielle du carbone et qu'il y a grand intérêt à diriger ses recherches de ce côté.

Il est indiscutable, d'ailleurs, que la suppression des chambres à réchauffer le gaz, entraînant la suppression de la valve et ses inconvénients, permet en outre de supprimer la perte de charge due au frottement du gaz sur les briques d'empilage. Mais l'expérience montre que, pour obtenir dans le four la même vivacité de combustion avec du gaz relativement froid, il faut compliquer le brûleur ou dispositif de mélange de l'air et du gaz.

Ce brûleur moins simple est plus délicat de construction, par suite moins robuste. Or, dans tout four Siemens, ancien ou nouveau système, il faut que le brûleur serve alternativement à l'entrée des flammes et à la sortie des gaz brûlés; si donc nous avons un brûleur moins robuste, nous augmentons encore ses chances de fusibilité et de dégradation. D'où nous concluons qu'il vaut mieux, pour le moment, se résigner aux inconvénients du four Siemens ancien modèle, parce que ce four est plus résistant.

Comme ayant beaucoup d'analogie avec le système de régénération dont nous venons de parler, nous indiquerons le procédé de M. C. Staffen.

Dans ce procédé, on recueille, par voie de dissolution dans l'eau, l'acide carbonique contenu dans les gaz brûlés, et c'est ce gaz, ainsi dépouillé d'azote, qu'on injecte, soit seul, soit mélangé à de la vapeur sous la grille des gazogènes.

On obtient ainsi un combustible très riche et d'un pouvoir calorifique très élevé.

Ce procédé, dont l'application doit d'ailleurs présenter de sérieuses difficultés, n'a pas encore reçu la sanction de la pratique.

Fours à combustion intensive. — Dans tous les fours à gaz dont nous venons de parler, le gaz et l'air sont amenés isolément du four dans des conduits distincts. Ils débouchent dans le four en nappes superposées ou venant à la rencontre l'une de l'autre sous des angles plus ou moins prononcés.

Ce mode de distribution, en rendant la combustion non instantanée, mais progressive, a l'avantage de répartir la chaleur sur une plus grande étendue, ce qui tend à uniformiser la température en tous les points du four.

Mais, par contre, on comprend qu'il ne soit possible d'obtenir une combustion complète qu'en amenant un excès d'air. Il s'ensuit que, jusqu'à présent, on n'a pas pu industriellement réaliser une combustion bien économique, vu que toute variation des quantités de gaz et d'air indispensables à une combustion absolue se décèle par une réduction correspondante de la chaleur rendue libre. Lorsque l'air est en excès, la chaleur de combinaison se trouve diminuée en raison du volume des gaz inertes entrant dans la réaction et qui s'échauffent au détriment de celle-ci. Si le comburant est distribué avec parcimonie, une partie du combustible échappe à toute oxydation.

Pour réaliser une combustion rationnelle, M. Bandsept a adopté un dispositif permettant d'opérer avant leur arrivée au four le mélange intime du gaz et de l'air. Ce mélange préalable demande, il est vrai, une certaine dépense de travail, mais elle est largement compensée par une meilleure utilisation du combustible et par la haute température à laquelle se produit la combustion.

Le combustible gazeux étant très concret et l'air ou l'oxygène s'y trouvant molécule à molécule, il en résulte que le refroidissement produit par la dissociation est compensé à un point tel que la température observée est très voisine de la température théorique dont est capable le gaz employé.

D'autre part, la concentration de la chaleur est poussée au maximum dans un espace très restreint.

Tels sont les principes sur lesquels repose le système de chauffage préconisé par M. Bandsept, principes dont l'application réalise la combustion sans fumée.

Nous ne pensons pas que ce mode de chauffage puisse être utilement appliqué aux fours de verrerie, pour lesquels une flamme longue est nécessaire, mais nous avons cru devoir signaler cette innovation qui pourra rendre et a déjà rendu de grands services dans certains cas particuliers, en raison de l'énorme quantité de chaleur qu'elle permet de donner en un temps très court.

La fumivorité absolue qui caractérise ce procédé de chauffage est d'ailleurs une considération qui, à elle seule, suffirait à en assurer la généralisation, surtout dans les grands centres industriels, où la profusion de matières charbonneuses rejetées par les cheminées d'usines ne laisse pas que de présenter des inconvénients sérieux pour le voisinage.

§ 3. — Gazogènes

35. — Diverses formes données à ces appareils. — On sait que le décrassage des grilles est la principale difficulté qu'on rencontre dans l'emploi des gazogènes. C'est une opération toujours pénible pour les ouvriers et en même temps défectueuse au point de vue de l'utilisation du combustible, en ce sens qu'elle occasionne un déchet considérable.

Dans le cas de gazogènes à grilles inclinées, on procède au décrassage en se servant de fausses grilles ou barreaux taillés en pointe, que l'on enfonce dans la masse des scories jusqu'à ce qu'elles viennent s'appuyer sur le mur formant le fond des gazogènes. Ces grilles soutiennent le combustible pendant que l'on enlève les barreaux formant la grille ordinaire. On enlève alors les mâchefers, on replace ensuite la grille, puis on enlève les barreaux mobiles.

Dans certains cas, on compose la grille de barreaux de section carrée, en ayant soin de laisser dans le fond un vide de 15 à 20 centimètres. L'ouvrier fait alors glisser les scories vers ce vide et les fait tomber en ayant soin de conserver assez de scories pour obturer, à la fin du nettoyage, ce vide ménagé à dessein.

Afin de rendre les mâchefers moins adhérents aux barreaux de la grille, on dispose très généralement dans le cendrier une bâche à eau. L'évaporation de l'eau amène un refroidissement des barreaux et facilite beaucoup les nettoyages, en même temps qu'elle augmente la durée des grilles. Nous ajouterons que, par sa décomposition au contact du coke incandescent, la vapeur d'eau

introduite ainsi en faible quantité se transforme complètement en oxyde de carbone et hydrogène qui enrichissent le gaz, sans porter préjudice à l'allure des gazogènes.

36. — Grilles Perret. — C'est dans cet ordre d'idées et pour assurer aux grilles une durée pour ainsi dire illimitée, que M. Michel Perret a construit des barreaux à grande surface (*fig.* 37) et plongeant sur une notable partie de leur hauteur dans l'eau d'une bâche placée sous le foyer.

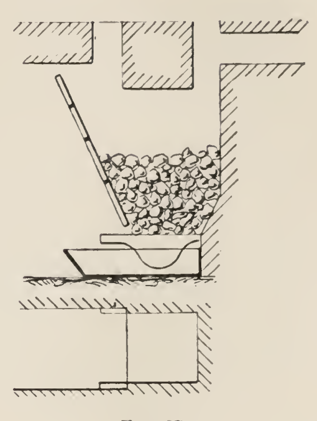


Fig. 37.

Les gazogènes qui sont munis de semblables grilles ont une allure vive, ce qui résulte de la surface de passage relativement considérable offerte à l'air ; en outre, le gaz produit est plus riche en éléments combustibles que celui qui est fourni par les gazogènes ordinaires Siemens, ainsi qu'on peut le voir par les analyses ci-dessous :

	Gazogène ordinaire Siemens	Gazogène à grille Perret
Acide carbonique.....	4,00	5,00
Oxyde de carbone....	24,50	24,00
Carbone d'hydrogène .	3,50	3,50
Hydrogène	6,00	12,50
Azote	62,00	55,00
	100,00	100,00

Avant de parler des gazogènes soufflés à l'air ou à la vapeur, nous donnerons la description de deux appareils,

dont l'un surtout nous paraît présenter les meilleures garanties au point de vue de l'extraction des scories.

37. — Gazogène Liégel. — M. Liégel, de Stralsund (Poméranie), a supprimé complètement la grille du gazogène et l'a remplacée par une fente longitudinale D, formée soit par deux pièces réfractaires accouplées, soit par deux barres de fer.

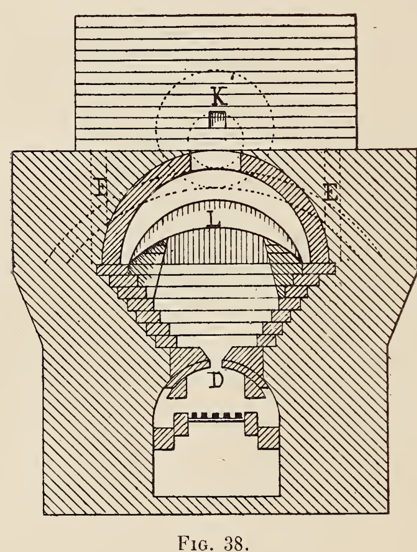


Fig. 38.

C'est cette disposition qui constitue le mérite principal de l'invention et qui la caractérise. (V. *fig*. 38.)

La forme conique du foyer et son rétrécissement jusqu'à cette fente permettent à l'air nécessaire à la première transformation de passer au centre même du combustible, sans suivre les parois du foyer. On arrive ainsi à ce que la moins grande quantité d'air possible traverse la masse sans être entré en réaction.

Il résulte de cette disposition que la température est assez élevée, à très peu de distance des lèvres de la fente, pour que les mâchefers s'y maintiennent en fusion et puissent être éliminés d'une manière continue en coulant d'eux-mêmes. Tout le travail consiste à surveiller de temps en temps cette fente, afin de faciliter la chute des scories qui tendent à se figer et afin de faire varier à

volonté la longueur libre de cette fente, ce qui permet de la façon la plus simple d'activer ou de modérer l'allure.

Il n'y a donc aucune espèce de décrassage, d'où régularité de marche et possibilité d'employer des combustibles de qualité médiocre.

Voici comment l'inventeur décrit les avantages que présente son appareil :

« Pour tirer le meilleur parti d'une combustion aussi parfaite que possible, il faut construire le foyer de manière qu'il ne puisse pas y entrer d'air superflu. Dans un foyer vertical dont le fond serait entièrement occupé par une grille, l'air tendra toujours à monter le long des parois lisses tout aussi bien et mieux que par les interstices plus ou moins chicanés du combustible. Diminuons les sections de la grille dans un sens, cet inconvénient sera réduit, pour atteindre un minimum quand la grille sera amenée à n'avoir comme dimensions que celles d'une simple fente.

« Pour être sûr, en tous cas, que l'air ne touche jamais les parois (ou le moins possible), je construis le foyer en l'élargissant très rapidement à partir de la fente. En outre, j'évite les surfaces lisses en faisant toutes les parois en gradins.

« La couche de combustible doit être le plus mince possible, afin de ne nécessiter qu'un faible tirage; elle doit cependant être assez grande pour que l'oxygène qui la traverse puisse être entièrement brûlé.

« Moins le combustible est gros, plus la couche peut être faible.

« Suivant les cas, la hauteur de la couche de combustible peut varier de 10 à 80 centimètres. L'expérience peut seule en décider; mais il est bon d'avoir pour

chaque cas un moyen de faire varier cette épaisseur suivant les besoins. Pour cela, dans mes fours je fais la fente plus longue qu'il ne faut et inclinée. On fait varier la hauteur du combustible en dégageant la partie de la fente qu'on juge nécessaire, soit à l'avant, soit à l'arrière.

« Il faut que les quantités d'air qui traversent le combustible soient aussi régulières que possible. Pour cela trois conditions sont à remplir :

« 1° L'épaisseur de la couche doit rester sensiblement égale ; on obtient cela avec un magasin de combustible aussi grand que possible ;

« 2° Les résidus non combustibles (scories ou mâchefers), qui se séparent du combustible, doivent être éliminés continuellement, afin que l'air entrant trouve toujours approximativement les mêmes passages entre les morceaux. On sait que sur les grilles ordinaires plus les intervalles des décrassages sont considérables, plus la combustion est mauvaise. Le seul moyen de s'approcher le plus possible de l'idéal est d'arriver à l'évacuation automatique des mâchefers par la fente. J'ai réalisé ce fait dans mes foyers ; toute cendre fond et coule automatiquement par la fente. Qu'ils soient facilement ou difficilement fusibles, je suis parvenu à faire écouler tous les mâchefers ; il suffit, pour ces derniers, de faire un petit feu secondaire sous la fente, petit feu naturellement entretenu, d'ailleurs, par les petits morceaux de combustible qui tombent. Tout le travail de l'ouvrier consiste à nettoyer de temps en temps les lèvres de la fente pour faire tomber les scories adhérentes.

« 3° Il est nécessaire que la force du tirage soit aussi égale que possible.

« Quant à la durée de mes foyers, on doit distinguer entre les briques qui n'ont qu'à supporter la chaleur et

celles qui sont touchées par la scorie liquide. Les premières, beaucoup de fabriques les fournissent convenablement aujourd'hui ; mais il n'y a pas de briques qui puissent résister à la scorie liquide ; jamais on n'en fera, car il y a là une combinaison chimique destructrice. Il n'y a qu'un seul moyen de conserver le foyer, c'est de faire en sorte que les mâchefers coulent constamment sur des mâchefers figés. C'est ce qui se réalise fort bien dans mes fours, soit à l'orifice de la fente, soit sur les gradins du foyer. Il en résulte que les blocs réfractaires n'ont jamais besoin d'être changés et que les foyers ont une durée indéfinie.

« Mes générateurs permettent de faire des arrêts sans qu'il soit nécessaire d'enlever le combustible. Il faut brûler pendant ces interruptions le coke nécessaire pour compenser la perte de chaleur par rayonnement. On a pu pousser ces arrêts jusqu'à soixante-douze heures. »

Gazogène Lührmann. — Le gazogène étant un appareil essentiellement continu, il était naturel de songer à l'alimenter d'une façon continue. C'est ce qu'a fait M. Lührmann. Il construisit un gazogène (*fig.* 39) muni d'une cornue horizontale en maçonnerie, dans laquelle le combustible frais distillait. Un piston animé d'un mouvement très lent enfonçait le combustible d'une façon continue à l'aide d'un dispositif analogue à celui qui était autrefois employé pour pousser les betteraves sur la

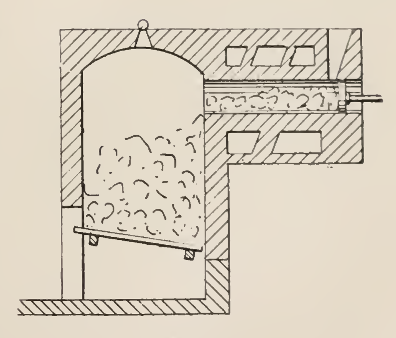


FIG. 39.

râpe. Le combustible, réduit à l'état de coke, venait tomber dans le gazogène où s'opérait sa transformation en oxyde de carbone.

Malheureusement, le combustible ne pouvait distiller dans la cornue qu'à l'aide d'une quantité de chaleur qu'il fallait prendre aux gaz brûlés s'échappant du four. On était ainsi amené à sacrifier une partie de l'action du récupérateur en envoyant à la cheminée des gaz encore chauds. Donc, à part l'alimentation presque continue, on perdait dans le manque d'action du récupérateur ce qu'on gagnait en faisant distiller le combustible par la chaleur emportée du four.

Pour cette raison, ces gazogènes sont maintenant abandonnés.

Gazogène Taylor. — Le gazogène Taylor fonctionne par injection d'air entraîné par un courant de vapeur, comme ceux dont nous allons maintenant nous occuper ; mais dans cet appareil on a eu surtout pour but, en opérant ainsi, d'améliorer la marche en facilitant le décrassage par suite du refroidissement que subissent les mâchefers sous l'action de ce courant d'air.

Ce qui distingue le gazogène Taylor (*fig.* 40), dont l'invention ne remonte qu'à quelques années et dont les applications sont déjà très nombreuses aux États-Unis, c'est que le décrassage s'y opère sans aucune difficulté et sans occasionner de déchet. On l'exécute en pleine marche sans apporter aucun trouble à l'allure de l'appareil.

Le gazogène Taylor se présente sous la forme d'un cylindre vertical en tôle, de 4 mètres de hauteur, garni à l'intérieur d'une chemise en briques réfractaires. Ce gazogène n'a pas de grille proprement dite. Les mâchefers réunis dans une trémie F viennent s'ébouler sur un

plateau P auquel on peut donner un mouvement de rotation au moyen de la manivelle M, agissant sur les roues R*r* qui commandent le pignon G.

Le plateau mobile P roule au moyen de galets sur le plateau fixe Q. Par cette disposition on évite tout ajustage précis, les dilatations se font librement et la rotation se produit sans grand effort.

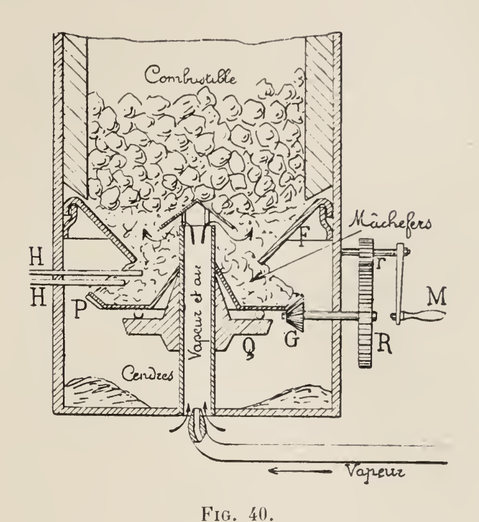


Fig. 40.

A l'état de repos, le cône d'éboulement des mâchefers s'arrête au bord du plateau mobile, mais si on imprime à ce dernier un mouvement de rotation, les mâchefers s'éboulent sur tout son parcours et tombent dans le cendrier. On facilite cette chute des mâchefers au moyen de barres de fer HH, qu'on enfonce plus ou moins dans leur masse.

Les mâchefers ne deviennent jamais collants, grâce au refroidissement provoqué par le jet d'air et de vapeur.

Pour mettre l'appareil en marche, on commence par remplir de mâchefers la trémie F, on ajoute ensuite un

peu de bois et de copeaux, qu'on allume et qu'on recouvre ensuite de combustible.

Voici la moyenne des analyses du gaz obtenu avec ce gazogène, brûlant dans un cas de la houille anthraciteuse, dans l'autre de la houille grasse :

	Houille anthraciteuse	Houille grasse
Oxyde de carbone....	27,00	27,00
Acide carbonique.....	12,00	12,00
Hydrogène	1,20	2,50
Carbure d'hydrogène .	2,50	2,00
Azote	57,30	56,50
	100,00	100,00

Pour parer à l'inconvénient résultant d'une agglomération accidentelle des mâchefers, soit par suite d'une négligence, soit par suite de l'emploi de combustible fort chargé de cendres très fusibles, on a ménagé, à la hauteur de la trémie tronconique, plusieurs portes de travail que l'on ouvre en cas de besoin.

38. — Gazogènes soufflés. — La nécessité où l'on se trouve souvent de placer les gazogènes dans des endroits où l'aération est défectueuse, leur lenteur de mise en marche et de remise en feu, le désir de produire un gaz riche en pouvoir calorifique avec des combustibles pauvres en matières volatiles, ont amené la construction de gazogènes soufflés, dans lesquels on fait intervenir l'air et la vapeur.

L'emploi de la vapeur a d'ailleurs permis d'obtenir une meilleure récupération, en ce sens que le gaz combustible arrive plus froid dans le récupérateur. Comme ce refroidissement est le fait d'une réaction qui, s'opérant dans le gazogène entre la vapeur d'eau et le coke incandescent,

a pour double résultat d'enrichir le gaz et d'empêcher une allure trop chaude du gazogène, on voit qu'il y a tout intérêt à faire usage de gazogènes soufflés à la vapeur.

Dans certains cas, on produit même industriellement un gaz dit « gaz à l'eau », dans la composition duquel il n'entre absolument que les produits de réaction entre le carbone et la vapeur d'eau.

Nous dirons d'abord quelques mots des gazogènes soufflés, dans lesquels la vapeur ne joue pas un rôle prédominant.

Gazogène Wilson (*fig.* 41). — Ce gazogène est à cendrier fermé et à injection d'air au moyen d'un koerting.

Il donne de bons résultats comme composition du gaz et comme rapidité de mise en marche, il permet de gouverner un four avec la plus grande facilité.

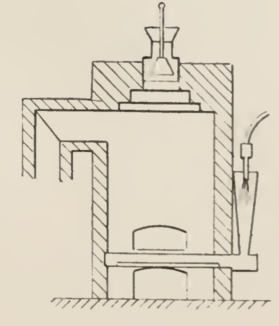


Fig. 41.

Mais la faible différence de niveau existant entre le sol de la halle et la grille du gazogène oblige à maintenir une forte pression, ce qui est une gêne pour l'ouvrier chargé de la conduite de l'appareil. De plus, pendant les décrassages, les portes du cendrier devant être ouvertes, la soufflerie doit être momentanément supprimée, et le gazogène se trouve n'avoir plus aucune action sur le four.

Gazogène Marteau (*fig.* 42). — Ce gazogène se compose d'une simple cuve carrée munie de grilles en fer

placées à la partie inférieure. Le combustible, distribué d'une façon continue par une hélice, vient tomber au centre de la cuve. Les foyers sont munis de portes d'une ouverture et d'une fermeture faciles.

Dans les murs séparant deux gazogènes accolés, on dispose une soufflerie qui permet d'amener sous la grille un jet d'air et de vapeur d'eau.

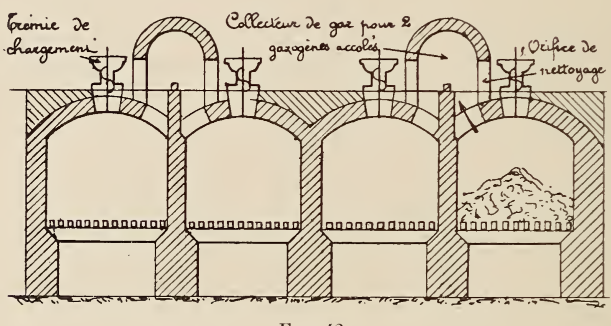


Fig. 42.

Ces gazogènes présentent presque tous les avantages des gazogènes Wilson sans en avoir les inconvénients ; leur seul défaut est d'exiger une différence de niveau de 0m,50 entre le niveau moyen de leur grille et le niveau inférieur des régénérateurs. Au cas où la soufflerie viendrait à manquer, ils ont l'avantage de pouvoir fonctionner à tirage naturel. Dans ces cas accidentels, on prend naturellement la précaution d'alimenter le gazogène avec un combustible un peu plus grenu et plus riche que celui qu'on utilise en marche habituelle.

Gazogène Lencauchez. — Ces appareils sont à radier de sole de grille arrosé et à vent soufflé ou à jet de vapeur. Ils donnent des gaz très riches dont la teneur en hydrogène varie de 6 à 20 0/0 suivant la nature du combustible. Même alimentés au coke et à tirage naturel, ils

fournissent un gaz dont la teneur en produits utiles peut atteindre 35 0/0.

Nous donnons ici la composition des gaz obtenus avec ces appareils, marchant dans des conditions différentes [1].

	AUX FINES de HOUILLE	AU COKE	A LA HOUILLE et à L'AIR CHAUD	A L'AIR FROID SOUFFLÉ
Hydrogène....	6,88	10,83	18,80	11,00
Oxyde de carbone........	25,84	21,76	21,30	27,65
Protocarbure d'hydrogène.	3,85	1.10	4,10	4,86
Bicarbure d'hydrogène.....	0,57	1,38	0,50	0,27
Oxygène......	0,00	0,00	0,70	0,00
Acide carbonique.......	0,45	3,57	1,60	3,42
Azote.........	62,41	61,36	53,00	53,80
	100,00	100,00	100,00	100,00

Nous signalerons une application très intéressante de ces gazogènes à la production de gaz dit « gaz pauvre », utilisé comme puissance motrice dans les machines à gaz. Le gazogène légèrement modifié et approprié à cet usage fonctionne à l'air froid soufflé et à l'anthracite.

Il utilise aussi très avantageusement des fines de houilles maigres, avec lesquelles il donne un gaz contenant environ 45 0/0 de produits utiles et dont voici la composition moyenne :

[1] On consultera avec grand profit l'intéressante étude qu'a publiée M. Lencauchez sur l'*enrichissement des gaz de gazogènes. Mémoires de la Société des Ingénieurs civils*, octobre 1892.

Hydrogène	20,00	45 0/0
Oxyde de carbone	21,00	
Protocarbure d'hydrogène.....	3,50	
Bicarbure d'hydrogène........	0,50	
Oxygène	0,50	55 0/0
Acide carbonique.............	5,00	
Azote.......................	49,50	
	100,00	

§ 4. — Combustibles

39. — Gaz à l'eau. — La fabrication du gaz à l'eau a pris, depuis quelques années, en Amérique (États-Unis) une importance considérable.

Les exigences, tous les jours croissantes, de l'industrie réclament en effet un combustible d'une puissance calorifique plus élevée que celle du gaz que fournissent les gazogènes fonctionnant à l'air. Dans ce dernier gaz, la proportion d'éléments utiles n'atteint que bien rarement 40 0/0 ; il s'y trouve donc au minimum 60 0/0 de gaz inertes : azote, acide carbonique, dont la présence abaisse considérablement la température de combustion.

On a alors pensé à fabriquer industriellement un gaz à haute puissance calorifique, tout en restant d'un prix de revient beaucoup moins élevé que le gaz d'éclairage. C'est alors qu'on a pensé à réaliser en grand la réaction bien connue de la vapeur d'eau sur le carbone incandescent, réaction qui donne lieu à la formation d'un gaz composé, à volumes égaux, d'oxyde de carbone et d'hydrogène, d'après l'équation :

$$C + HO = CO + H.$$

S'il avait fallu porter et maintenir le carbone à la température rouge, nécessaire pour la réaction, à l'aide de combustible dépensé spécialement à cet effet, il est évident que la question serait restée dans le domaine du laboratoire ; mais on a pensé à tirer parti de la chaleur emmagasinée dans les gazogènes fonctionnant à l'air soufflé, pour produire alternativement dans ces gazogènes d'abord du gaz à l'air, puis du gaz à l'eau.

Le gaz à l'eau est donc obtenu industriellement dans des gazogènes à air soufflé, et, par intermittence, avec du gaz ordinaire de gazogène. Au début, le gazogène est soufflé au vent et l'on obtient un gaz semblable à celui que donnent les appareils Siemens, c'est-à-dire un mélange d'oxyde de carbone et d'azote.

Cette période se termine quand le foyer a atteint une température suffisamment élevée, ce que l'on peut juger par des regards. A ce moment, on arrête la soufflerie et on fait arriver un courant de vapeur.

La vapeur d'eau, au contact du charbon rouge, se décompose en produisant de l'hydrogène et de l'acide carbonique, mélange qui, en traversant la couche supérieure de coke incandescent, se dépouille de son acide carbonique, qui se transforme en oxyde de carbone. On obtient finalement un gaz dont la composition moyenne est sensiblement :

Oxyde de carbone	47
Hydrogène.............	46
Acide carbonique.......	3
Azote..................	4
	100

On cesse d'introduire la vapeur quand la température n'est plus suffisamment élevée pour permettre la réduc-

tion de l'acide carbonique ; on remet alors en marche la soufflerie d'air et ainsi de suite.

Dans des essais faits sur l'emploi du gaz à l'eau, en 1872, par M. Tessié du Mothay, on soufflait de l'air pendant dix minutes, puis de la vapeur pendant cinq minutes ; les insufflations d'air et de vapeur se reproduisant ensuite et alternativement, pendant les mêmes intervalles de temps.

Comme le gaz d'eau et le gaz de gazogène, ainsi obtenus, ont une puissance calorifique bien différente, on les recueille chacun dans un gazomètre distinct, en utilisant le gaz d'air au chauffage des fours à température relativement basse, et réservant le gaz d'eau pour l'obtention de températures très élevées et pour l'éclairage.

Différents systèmes ont été appliqués pour la préparation du gaz d'eau. Dans les uns, l'air et la vapeur sont introduits par le bas du gazogène (Dowson); dans d'autres (Loomis), le courant de vapeur seul arrive par le bas, la marche à l'air ayant lieu avec courant d'air descendant.

Cette disposition, qui consiste à alimenter le gazogène au moyen d'un courant d'air descendant obtenu par aspiration, présenterait, paraît-il, un grand nombre d'avantages : les cendres étant attirées dans le cendrier ne forment pas de mâchefers, d'où nettoyage très facile ; les vapeurs grasses, les goudrons et huiles schisteuses, que distillent les couches supérieures fraîchement chargées, sont entraînés dans la couche inférieure incandescente, dans laquelle ils sont transformés en hydrocarbures fixes ; l'air, en circulant de haut en bas et en traversant le combustible, se chauffe graduellement avant d'atteindre la partie incandescente, et par suite il se produit une plus forte proportion d'oxyde de carbone et moins d'acide carbonique.

Nous ne parlerons pas de l'application du gaz d'eau à l'éclairage, application au sujet de laquelle on a émis les idées les plus contradictoires, au point de vue hygiénique surtout. Mais, cherchant à nous rendre compte de l'avenir de ce gaz comme combustible, nous le comparerons au gaz ordinaire du gazogène.

Nous avons calculé que 1 kilogramme de carbone transformé en gaz à l'eau fournit $3^{m3},72$ d'un gaz composé à volumes égaux de :

$1^{m3},86$ oxyde de carbone donnant	......	5,592 calories.
$1^{m3},86$ hydrogène —	......	4,846 —
Soit au total	.....	10,438

La température de combustion sans excès d'air serait 2 758° (nous admettons que la détermination de la température théorique de combustion peut servir de base à la comparaison entre les divers combustibles pris au même état), et le volume total des produits de la combustion :

$$1^{m3},86 + 1^{m3},86 + 7^{m3},44 = 11^{m3},16,$$

soit trois fois le volume du gaz lui-même.

Dans le cas du gaz à l'air nous trouvons que 1 kilogramme de carbone fournirait :

$1^{m3},86$ oxyde de carbone ;
$3^{m3},72$ azote.

Soit $5^{m3},58$ de gaz combustible, dont la température de combustion, sans excès d'air, est de 1 818°. Le volume total des produits de la combustion s'élèverait à :

$$1^{m3},86 + 7^{m3},44 = 9^{m3},30,$$

soit une fois 2/3 le volume du gaz combustible.

Des chiffres ci-dessus nous pouvons tirer les conclusions suivantes :

Avec un poids donné de carbone transformé en gaz à l'eau, on obtiendra, comparativement à ce que fournirait le même poids de carbone transformé en gaz à l'air :

1° Un volume de gaz combustible moins considérable, quoique contenant une quantité double d'éléments combustibles (ce qui permettra de faire usage de gazogènes de capacité réduite et par suite d'une conduite plus facile;

2° Un volume plus considérable de gaz brûlés (d'où possibilité de chauffer un espace de plus grande capacité sans dépenser plus de houille ou de coke ;

3° Une température plus élevée de 939° (2 757°-1 818°), ce qui abrègera la durée du travail au four.

Nous n'ignorons pas que les excédents signalés ci-dessus ne sont pas obtenus gratuitement, nous admettrons même qu'il faudra fournir aux gazogènes une quantité de chaleur au moins égale, peut-être supérieure à celle qu'on obtiendra comme excédent au four; mais, quand même on serait en perte du côté du gazogène, n'existe-t-il pas certains cas particuliers où la nécessité d'obtenir au four une température plus élevée que celle que l'on peut obtenir avec le gaz à l'air rendra cette perte plutôt fictive que réelle? Ce sera une quantité négligeable en raison des immenses avantages qu'on retirera, dans ces cas particuliers, de l'emploi du gaz à l'eau.

En résumé, nous ne mettrons pas en doute que, étant donnés les perfectionnements apportés à la construction des appareils destinés à produire et à utiliser le gaz à l'air, ce gaz soit produit plus économiquement qu'un égal volume de gaz d'eau; mais nous notons que le gaz d'eau, en raison de son pouvoir calorifique élevé, de l'accroissement considérable de volume qui résulte de sa combus-

tion, et de la haute température qu'il permet d'obtenir, est appelé à remplacer le gaz d'air dans la plupart de ses applications, surtout dans celles où une température excessivement élevée est une condition nécessaire.

A en juger d'ailleurs par l'extension de cette application aux usines d'Essen et de Hoerde qui, les premières en Europe, en ont tenté l'essai, il est logique de penser que les résultats ont été satisfaisants.

40. — Fours chauffés au gaz naturel. — L'époque n'est pas éloignée où dans certains pays le chauffage au charbon, au gaz, sera remplacé par les huiles ou essences de pétrole, par les gaz naturels même, ce qui a lieu actuellement à Pittsburg; à 150 kilomètres environ de New-York, où toutes les industries implantées en ce pays, et elles sont fort nombreuses, sont chauffées par ce moyen.

Le gaz naturel de Pittsburg a réduit de moitié la consommation du charbon dans cette ville, et il est probable qu'il le remplacera tout à fait dans l'avenir. On s'en sert aujourd'hui dans les fabriques principales, dans les hôtels, dans les établissements publics, et son emploi se généralise même dans les résidences particulières. Comme il ne résulte de ce gaz ni poussière ni noir de fumée, la proportion de suie dans l'atmosphère est déjà réduite de 50 0/0, et elle diminue de mois en mois. Mais il n'y a pas seulement progrès sous le rapport du bien-être et de la propreté, il y en a aussi sous le rapport de l'économie.

Un des directeurs de verreries de Pittsburg déclare que, par l'emploi du gaz comme combustible, au lieu du charbon, il obtient une économie considérable. Une partie de cette économie résulte de la nature du combustible;

une autre consiste dans le fait que le gaz ne laisse pas d'escarbilles, et que l'enlèvement des cendres ou escarbilles, ainsi que leur transport, coûte, avec le chauffage au charbon, de 3000 à 4000 dollars par an. Il y a encore une autre économie dans le travail : le four dans lequel on brûle du charbon exige deux hommes occupés au charbon, à 17 dollars par semaine chacun ; le four à gaz n'en demande pas un ; il n'y a pas besoin d'entretenir le feu, ni de remuer le combustible. Enfin, l'économie la plus grande, et la plus importante, réside dans la durée des fours. Le four à glaces, demandant une chaleur de 1 600 à 1 800°, s'use assez rapidement en brûlant du charbon, tandis qu'avec le gaz pour combustible sa durée est notablement augmentée.

Sans exagérer les avantages à tirer de l'emploi du gaz naturel, en réalité il ne peut y avoir de doute sur les faits. Le seul point incertain, c'est la durée d'écoulement ou de production du gaz. Quelques personnes prétendent que ce ne sera qu'une affaire temporaire, mais ce sont les mêmes personnes probablement qui prétendaient que le pétrole ne durerait pas ; si le gaz naturel tient les promesses faites en son nom, il sera la cause d'une révolution sérieuse dans les manufactures, et surtout dans les contrées où on le trouve à l'état naturel. Le gaz est beaucoup plus répandu, plus universel qu'on ne le pensait. Au point de

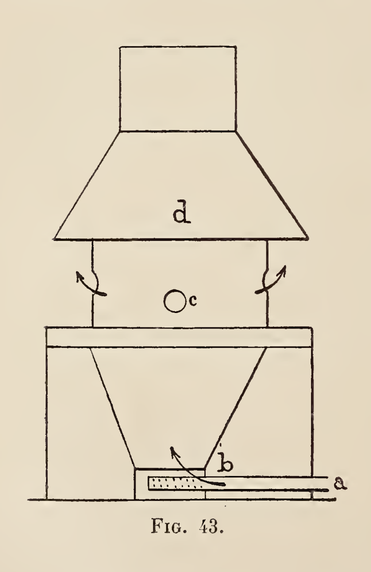


Fig. 43.

vue géologique, son écoulement au jour peut être comparé au fonctionnement d'une soupape de sûreté, et cet écoulement est alimenté par un réceptacle peut-être inépuisable.

La figure 43 montre un four à verre chauffé par le gaz naturel (ce gaz contient des hydrocarbures, de la paraffine). Le gaz entre par un tuyau de $0^m,025$, *a* ; ce tuyau est perforé à l'extrémité placée à l'intérieur du four. L'air entre en *b* par un espace ouvert au bout du tuyau, dont on régularise le débit en augmentant ou diminuant la section. Les gaz en excès ou brûlés sortent par les ouvertures *c* et se rendent ensuite à la cheminée d'appel en passant par la porte *d*.

La grille des anciens fours est ici remplacée par un bâti de briques. On peut, dans les fours transformés, laisser la grille, mais on la couvre d'une série de briques, et le gaz pénètre par les ouvertures ménagées de telle façon entre elles, que l'air soit appelé en même temps par des ouvertures parallèles, afin de permettre la combustion.

Voici le four (*fig.* 44) employé dans certaines verreries de Pittsburg, et qui est un perfectionnement de celui décrit ci-dessus. Le gaz arrive dans le tube *a*, de $0^m,055$ à $0^m,060$ de diamètre, qui s'étend le long des deux parois du four ; de ce tube s'en détachent d'autres d'un diamètre plus faible (environ $0^m,01$), par lesquels le gaz entre dans le four par les fentes *b* pratiquées dans le siège du four. L'air entre en *c*, monte par les canaux *d* et pénètre dans le four au-dessus des arrivées de gaz en *e*; c'est le point de combustion d'où la flamme pénètre dans le four. Les produits de la combustion s'échappent par les ouvertures dans les cheminées d'appel. Une quantité déterminée d'air est introduite par la porte *g*,

pendant l'opération de l'affinage, afin d'aider à l'obtention d'une haute température; cet air est donc introduit dans le four d'une manière facultative.

Il nous est impossible de terminer ce qui a trait au chauffage des fours en fusion par le gaz naturel sans parler de deux autres appareils employés avec succès dans les verreries et cristalleries d'Amérique. Cette description complète ce que nous avons dit au sujet des fours à fusion, et place cette question au niveau des progrès le plus récemment réalisés en verrerie pour le chauffage des fours.

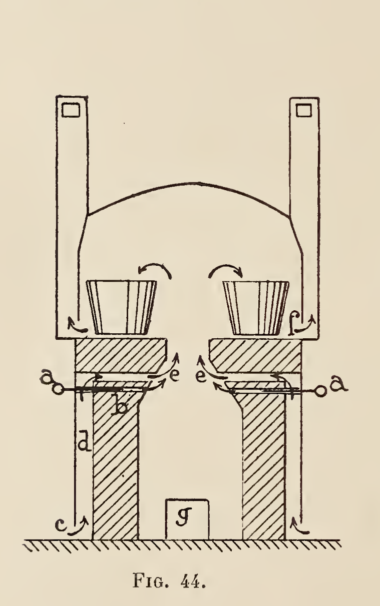


Fig. 44.

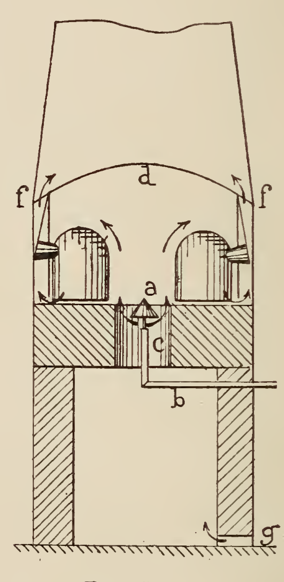


Fig. 45.

La figure 45 représente le four Atterburg, employé en cristallerie, et qui peut être aussi bien employé en verrerie.

Ce brûleur perfectionné consiste en un capuchon *a* construit en briques réfractaires. Il est de forme conique et d'environ 10 pouces de diamètre; il est fixé dans sa

position par un barreau *b* en fer, d'environ un quart de pouce de diamètre, qui passe le long du tube *c*. Ce capuchon peut varier dans le sens de la position verticale.

Le but de ce capuchon, c'est la dispersion du gaz tandis qu'il s'échappe du tube *c*. Ainsi, il s'étend et se mélange plus intimement avec l'air, et par là augmente la combustion. Le tube *c* à gaz a 3 pouces de diamètre; il s'ouvre à la partie supérieure dans toute sa dimension, le barreau-tige *b* qui supporte le capuchon passant à travers.

Le capuchon protège aussi la couronne *d* qui, sans lui, serait vite détériorée, si on permettait au gaz de la frapper directement en s'échappant du tube *c*.

L'air entre par un certain nombre d'ouvertures étroites *g* dans le mur, au niveau du sol ; on en régularise l'arrivée et le débit en les fermant avec des briques. Les gaz perdus s'échappent par les ouvertures jusqu'aux conduits *f* et vont de là à la cheminée ; il suffit d'environ 10 onces de pression pour ce four.

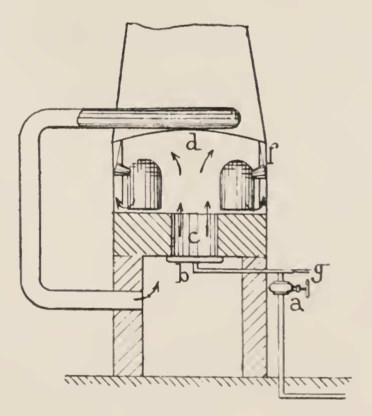


Fig. 46.

Le four représenté par la figure 46 est dû à M. Joseph Anderson ; il est employé à la glacerie américaine de O'Hara.

Il y a plusieurs innovations dans ce four : la première est la méthode de chauffer l'air pour la combustion ; la seconde est la disposition qui permet d'employer la benzine, ou tout autre combustible liquide, par lequel on

peut conserver le four chaud dans le cas où le gaz viendrait à manquer. Le gaz est réglé par la valve *a*; le brûleur *b* est un tube d'un demi-pouce, de forme circulaire, percé de nombreux petits trous d'environ 1 millimètre à 1 millimètre 1/2 de diamètre, et placé sous le siège du four, comme on peut le voir. Il est placé de manière que le verre (légèrement ramené en arrière), qui coule des pots cassés pour aller dans la cuve, ne le rencontre pas et n'empêche pas l'échappement régulier des gaz.

Le brûleur est en deux sections, dont l'une peut, en tout temps, être enlevée pour les réparations, ou pour toute autre cause, tandis qu'on peut, avec l'autre, conserver sa température, car il y a un tube fournisseur séparé pour chaque section.

L'air nécessaire à la combustion entre dans le tube régénérateur en *d*, passe par ce tube en descendant, en sort, remonte, comme l'indiquent les flèches sur le dessin, et vient en contact avec le gaz sous le siège du four, en *c*. Ce tube régénérateur est fait d'une forte feuille de fer; il a environ 16 pouces de diamètre; il est de forme circulaire, aussi grande que possible. On le place dans la souche de la cheminée, juste au-dessus de la voûte ou chapeau du four, de manière que la chaleur perdue, qui s'échappe par les tuyaux *f*, frappe directement sur lui, élevant la température de l'air, et aidant ainsi grandement à l'obtention d'un haut degré de chaleur pour cet air, au moment où il vient en contact avec les gaz. La possibilité de maintenir la chaleur dans ce four, dans le cas où le gaz viendrait à manquer pour une cause quelconque, est d'une grande importance.

La méthode d'emploi d'un combustible fluide au lieu d'un gaz est facile avec ce four. Le petit tube *g* est en com-

munication avec la cuve ou tout autre réservoir qui contient le liquide destiné à la combustion, et cette cuve est élevée de manière que l'huile coule tout naturellement jusqu'au brûleur *b*. Quand on emploie le combustible liquide, la valve à gaz *a* est fermée, et une autre valve sur le tube *g*, qui communique à la cuve, est suffisamment ouverte pour permettre au liquide de ruisseler goutte à goutte dans le brûleur *b*, où la chaleur le vaporise immédiatement, et d'où il s'échappe exactement comme le gaz ; il vient au contact de l'air chaud et la combustion s'opère. Ce four a fait ses preuves, on y a travaillé constamment depuis le jour où, pour la première fois, on a employé le gaz naturel, c'est-à-dire depuis plus de huit ans, sans avoir eu besoin de réparations notables, et il ne paraît pas devoir en nécessiter d'ici longtemps.

41. — Combustible utilisé dans les gazogènes. — Quel que soit le type de gazogènes qu'on emploie, il y a toujours intérêt à ne faire usage que de charbons secs et nouvellement extraits. En effet, dans la zone supérieure ou zone de distillation, l'eau qu'apporte avec lui un combustible mouillé se volatilise, et vient prendre dans les conduites la place du gaz combustible. Il en résulte un refroidissement inutile du gazogène et une diminution de l'activité d'allure.

Quant au combustible fraîchement extrait, il est naturel de ne pas le laisser perdre dans l'atmosphère des matières volatiles qui seront utilisées dans le four; aussi y a-t-il intérêt à consommer du charbon qui n'a pas séjourné longtemps à l'air et en grands tas.

Ceci explique comment les usines qui reçoivent leur combustible au jour le jour consomment moins que celles qui, par leur situation, sont contraintes de recourir aux

transports par eau et d'avoir toujours un grand stock de combustible.

Le plus généralement, les gazogènes sont alimentés non par une seule espèce de houille, mais par un mélange en proportions déterminées de deux ou plusieurs charbons, les uns très gras, collants, les autres gras à longue flamme, d'autres plus maigres ; assez souvent même, quand la base du mélange est une houille collante, on lui adjoint une certaine quantité de coke en menus fragments.

Ces mélanges de houille sont fréquemment préparés à la pelle et, dans ces conditions, ne laissent pas que d'être très onéreux. D'autre part, le dosage présente forcément des irrégularités résultant soit d'erreur, soit de négligence des ouvriers qui, n'étant pas surveillés constamment, n'apportent pas dans l'exécution de ce travail tous les soins que son importance comporte.

Pour obvier à ces inconvénients, M. Frère, directeur de l'usine à gaz de Saint-Quentin (Aisne), a imaginé et construit un appareil mélangeur automatique, fort bien conçu, et dont nous ne saurions trop recommander l'emploi.

42. — Appareil à mélanger les combustibles. — Nous donnons la description sommaire d'un appareil, construit pour mélanger deux natures de houille.

Cet appareil (*fig.* 47) se compose de deux hélices H ou vis sans fin, d'égales dimensions, dont l'extrémité inférieure plonge dans une trémie T. Les charbons, jetés à la pelle dans les trémies, sont élevés à la partie supérieure, où ils viennent tomber dans une auge en fonte, d'où ils sont entraînés par une vis sans fin qui complète le

mélange et le transporte au-dessus d'orifices d'où il tombe sur le sol.

On comprend qu'on puisse obtenir tel ou tel dosage déterminé qu'on désirera, en donnant aux deux vis élévatrices une vitesse différente et correspondant à ce dosage.

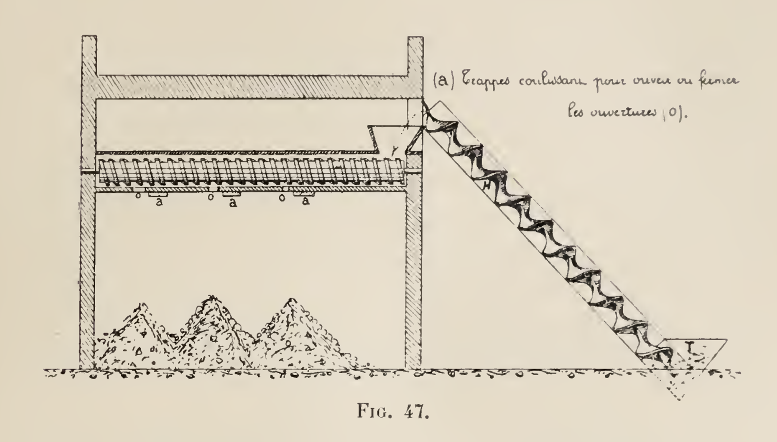


Fig. 47.

D'autre part, il est facile de disposer l'appareil de façon à lui faire exécuter un mélange plus complexe, de trois ou quatre sortes de houilles.

43. — Analyse et essais des combustibles. — Sans entrer dans le détail des opérations, analyses chimiques ou essais directs, qu'il convient d'exécuter si l'on désire être renseigné exactement sur la valeur réelle des houilles qu'on utilise, et sur le mode d'emploi qui convient le mieux à chacune d'elles prise en particulier, nous indiquerons sommairement comment on peut rapidement avoir, à ce sujet, des renseignements suffisamment exacts pour la pratique.

On procède tout d'abord au dosage des cendres, des principes volatils à la température du rouge vif, et du

carbone fixe (ou coke, duquel on défalque le poids des cendres).

Ces résultats ne suffisent pas pour classer une houille, car ils ne donnent aucun renseignement sur la nature grasse collante des houilles ; l'aspect du coke peut, il est vrai, donner quelques indications, mais nous les jugeons encore bien insuffisantes.

Si à ces renseignements on peut joindre ceux qui sont donnés par une analyse élémentaire : dosage du carbone, de l'hydrogène, de l'oxygène et de l'azote, il devient alors facile de rapporter une houille quelconque à un type déterminé et de prévoir dans quelles conditions l'emploi de cette houille sera le plus rationnel.

Nous ne ferons que rappeler sur quel principe repose la détermination du pouvoir calorifique des houilles par le procédé Berthier, qui est celui qu'on emploie généralement.

Dans cette méthode on admet que les quantités de chaleur émises par les différents combustibles sont entre elles dans le rapport des quantités d'oxygène que ces combustibles absorbent en brûlant.

On opère l'oxydation du combustible au moyen d'un oxyde métallique, la litharge, facilement réductible, et du poids de métal réduit il est facile de calculer, sinon la puissance calorifique, du moins l'équivalent en carbone du combustible essayé.

Cette méthode donne des résultats sensiblement exacts dans les essais de coke ; mais pour les houilles il est nécessaire de les compléter par une analyse élémentaire, afin de tenir compte de l'action réductrice propre à l'hydrogène libre.

Bombe calorimétrique de M. Berthelot, modifiée par

M. Malher. — En raison de l'incertitude des résultats donnés par la méthode à l'oxyde de plomb, nous préférons de beaucoup faire usage de la bombe Berthelot.

Cet appareil (*fig.* 48), construit par M. Berthelot pour des recherches scientifiques, a été modifié par M. Malher, ingénieur des mines, qui l'a appliqué à la détermination du pouvoir calorifique des combustibles solides, liquides ou gazeux.

Il est constitué par une enceinte métallique, sorte d'obus en acier, émaillé à l'intérieur, d'une capacité de 650 centimètres cubes, dans lequel on effectue la combustion à l'aide d'oxygène sous pression.

L'inflammation est produite à l'aide d'un courant électrique qui porte au rouge un fil de fer très fin et de poids connu.

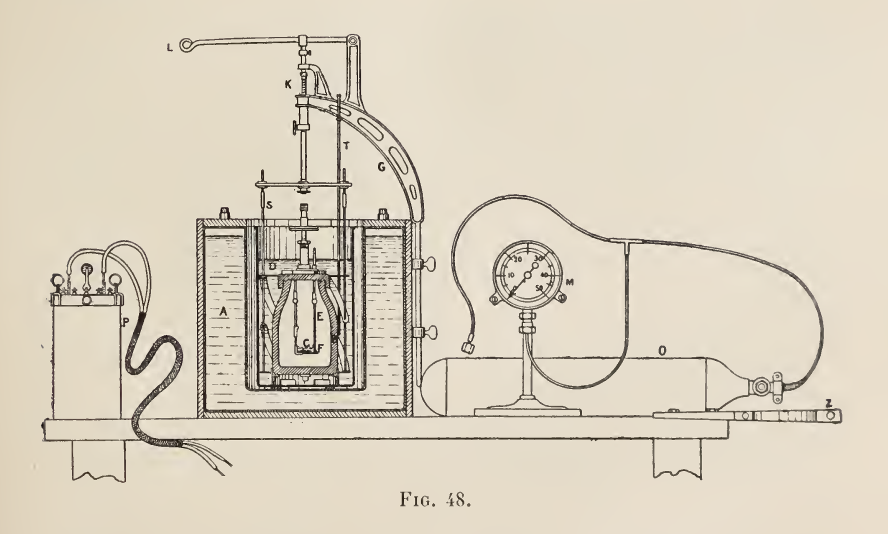


Fig. 48.

La chaleur développée est communiquée à l'eau d'un calorimètre dans lequel est plongée la bombe. L'élévation de température de l'eau est constatée à l'aide d'un thermomètre gradué en centièmes de degré.

Cet appareil nous paraît devoir donner des résultats absolument exacts ; cependant, dans le cas de combustible gazeux, il nous semble que les résultats ont besoin d'être complétés par l'analyse chimique.

En effet, des gaz possédant le même pouvoir calorifique peuvent, en pratique, se comporter de façon bien différente ; ils peuvent par leur combustion ne pas exiger le même volume d'air et par suite ne pas donner la même température.

Il peut y avoir entre les températures de combustion de deux gaz, identiques comme puissance calorifique, un écart très considérable pouvant atteindre 150°, comme on peut le voir dans le tableau ci-après, où nous comparons entre eux cinq gaz possédant le même pouvoir calorifique.

	I	II	III	IV	V
CO	21,00	25,00	23,00	19,00	27,00
CO^2	5,00	4,00	6,00	7,00	2,00
C^2H^4	2,00	3,00	5,00	4,50	1,00
H	12,00	4,10	0,00	6,00	8,20
Az	60,00	63,90	66,00	63,50	61,80
	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
Pouvoir calorifique par M^3.	1114	1114	1114	1114	1114
Val. des produits brûlés..	1^{m3},860	1,882	1,960	1,950	1,804
Température théorique de combustion	1808°	1790°	1725°	1725°	1866

Il est logique d'admettre que ces écarts de température ne sont pas sans influence au point de vue pratique.

Ainsi, dans certains cas, il est des réactions qui, exigeant une température voisine de 1800°, ne pourront pas être réalisées avec les gaz III et IV, tandis qu'elles s'ef-

fectueront très facilement avec le gaz V ; et cependant l'emploi de la bombe calorimétrique aurait indiqué pour ces divers gaz une valeur identique, puisqu'ils ont tous pour pouvoir calorifique 1 114 calories par mètre cube.

En outre, il est encore un élément dont la bombe ne permettrait peut-être pas facilement de tenir compte, nous voulons parler de la vapeur d'eau qui existe dans le gaz en proportion variable.

Dans des essais faits sur du gaz de gazogène Siemens à tirage naturel, nous avons trouvé jusqu'à 5 et même 6 0/0 d'eau en volume, soit environ 50 litres par mètre cube ou 40 grammes.

Or, un gaz renfermant 40 grammes de vapeur d'eau par mètre cube serait saturé pour une température de 30° à 35°.

Pour que la bombe puisse tenir compte de l'eau dans l'essai d'un semblable gaz, il faudrait que la combustion fût effectuée dans un laboratoire dont la température serait au moins égale à 35°. L'eau du calorimètre ainsi que la bombe devraient naturellement aussi posséder une température de 35°.

Peut-être M. Malher tourne-t-il la difficulté par un moyen qu'il est assez facile de concevoir, mais il n'en est pas fait mention dans les descriptions de son appareil.

44. — Analyse des gaz combustibles. — Le but de l'analyse des gaz dans les laboratoires industriels est d'avoir, à chaque instant, des données sur la marche des divers appareils produisant ou utilisant le gaz. Ces données ne sont pas seulement d'un haut intérêt théorique, mais encore et surtout elles présentent, au point de vue pratique, une utilité incontestable, car c'est par elles seules qu'on est arrivé à avoir des vues exactes sur

la valeur intrinsèque des gaz combustibles, sur l'utilisation plus ou moins parfaite du combustible dans les gazogènes et sur la combustion plus ou moins rationnelle dans les fours, etc.

Il est inutile de signaler plus longuement ici tous les avantages qu'on peut tirer de l'analyse du gaz ; la preuve la plus éclatante des services qu'elle a rendus est l'extension rapide que cette branche spéciale de l'analyse a prise depuis quelques années. — De nombreux appareils ont été imaginés pour rendre les analyses de gaz aussi précises que possible, en même temps que très rapides, et d'une exécution facile.

Une des difficultés principales est d'obtenir un bon échantillon moyen. — En effet, la nécessité de n'opérer que sur un faible volume ne permet pas de recueillir du gaz pendant une longue durée, d'où cause d'erreur résultant des variations de composition du gaz.

Le meilleur moyen, à notre avis, consiste à prendre d'abord un courant principal à grand débit à la source de gaz et, sur ce courant, de brancher un courant secondaire plus faible, lequel constituera la prise d'essai moyenne.

Nous ne pouvons pas ici nous étendre sur les divers procédés et méthodes en usage dans l'analyse des gaz ; nous nous contenterons d'indiquer au lecteur qu'il pourra puiser de sérieux et utiles renseignements à ce sujet dans les ouvrages désignés ci-dessous[1].

Parmi les nombreux appareils dont on peut faire usage pour l'analyse rapide des gaz, nous indiquerons et décri-

[1] *Encyclopédie chimique : Gaz et analyse,* par M. G. Ogier ; — *Manuel pratique de l'analyse industrielle des gaz,* par Ch. Winkler — *Traité pratique de chimie métallurgique,* traduit de l'allemand, par E. Vlasto.

rons sommairement l'appareil inventé par M. Coquillion. Il ressemble quelque peu à l'appareil bien connu d'Orsat, mais il a sur ce dernier l'avantage de permettre d'effectuer rapidement et de façon sensiblement exacte le dosage des hydrocarbures ; en outre, on évite — en ramenant le gaz dans le mesureur avant chaque lecture — l'inconvénient et les erreurs résultant des tubes capillaires.

L'appareil (*fig.* 49) se compose d'un tube mesureur M divisé en cent parties égales, mais dont la partie inférieure, d'un diamètre plus étroit, est graduée en dixièmes de centimètres cubes.

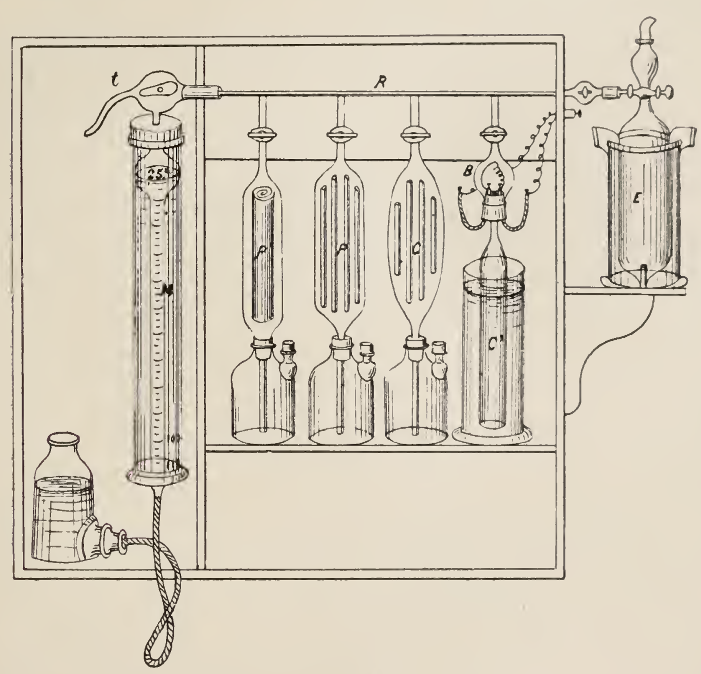


Fig. 49.

Ce mesureur est entouré d'un manchon plein d'eau pour maintenir la température constante ; il est relié à la partie inférieure à un flacon élévateur contenant de

l'eau ; à la partie supérieure avec un tube capillaire horizontal formant la rampe R et à un petit tube recourbé *t* d'introduction du gaz. La rampe est en relation avec trois flacons à réactifs P′, C, P (P′ renfermant une solution de potasse, P contenant du pyrogallate, C contenant du chlorure de cuivre), avec le brûleur B, se continuant par la cloche C′, et enfin, à son extrémité, avec une cloche E surmontée d'un réservoir à brome. Cette cloche E est destinée spécialement au dosage des carbures de la série $C^{2n}H^{2n}$, et elle peut facilement être séparée du reste de l'appareil, dans le cas où on n'a pas à effectuer le dosage de ces divers carbures.

Le brûleur B consiste en une petite cloche élargie à son sommet et fermée par un bouchon en caoutchouc muni de trois trous. Dans deux de ces trous passent des tiges verticales en laiton servant à fixer à l'intérieur du brûleur un fil de palladium qui sera porté au rouge par le courant de deux piles Bunsen. Le troisième trou du bouchon en caoutchouc porte une cloche C′ plongeant dans une éprouvette remplie d'eau.

Supposons qu'on veuille faire l'analyse d'un gaz renfermant CO^2. O. CO. C^2H^4. AzH. C^4H^4, ou homologues. On opère d'abord à l'aide des cloches P′, C, P, le dosage de CO^2. O. CO. Le gaz est ensuite chassé dans la cloche E, où on introduit quelques gouttes de brome ; de là le gaz est ramené dans le mesureur après avoir été dépouillé des vapeurs de brome dans le flacon à potasse. La diminution de volume représente C^4H^4 et homologues. Le dosage de C^2H^4 et H s'effectue en faisant circuler le gaz, additionné au préalable d'une quantité déterminée d'oxygène dans le brûleur B dont le fil de palladium est porté au rouge.

On détermine, après la combustion, le volume de CO^2

formé, d'où on déduit la teneur en C^2H^4. D'après la contraction observée après combustion, on connaît l'hydrogène et enfin, après absorption de l'excès d'oxygène, on mesure directement l'azote. Ce dosage direct de l'azote est en même temps un contrôle du dosage de l'hydrogène.

On ne doit faire aucune lecture avant d'avoir, au moyen de la cloche C′, fait passer un courant d'eau dans la rampe R, qui ramène la totalité du gaz dans le mesureur. Cette possibilité de faire des mesures exactes rend très précieux l'usage de l'appareil Coquillion, dont le seul inconvénient (partagé par tous les instruments du même genre) est de ne pas donner de certitude absolue quant au dosage du CO^2, en raison de la solubilité de ce gaz dans l'eau.

Nous avons fait subir à l'appareil Coquillion quelques modifications dans le but de le rendre plus spécialement applicable à l'analyse du gaz des gazogènes. Nous ajouterons que, dans ce cas, on peut s'éviter l'ennui de la préparation d'oxygène pur, et opérer la combustion avec de l'air.

45. — Analyse des produits de la combustion. — L'analyse des gaz brûlés doit être le complément nécessaire de l'examen des produits combustibles. Il n'est pas suffisant en effet de produire de bon gaz, il faut encore savoir en tirer un bon parti, le bien brûler. On n'y arrivera qu'en multipliant les analyses; mais le plus souvent on recule devant la délicatesse et la longueur de ces analyses, et il semble qu'on n'ait pas conscience que le résultat de cette négligence peut être parfois désastreux.

Pour ne citer qu'un cas, le plus fréquent certainement

et celui dans lequel l'analyse des produits gazeux est le plus utile, nous rappellerons les pertes considérables de combustible qui résultent du défaut de réglage de la combustion dans les foyers des générateurs de vapeur, des fours, etc. Faute d'analyser les produits gazeux de cette combustion, on laisse pénétrer dans les foyers beaucoup plus d'air qu'il ne serait strictement nécessaire, et une quantité correspondante de combustible est ainsi perdue: employée à chauffer une masse d'air inutile depuis la température ordinaire jusqu'à celle que possèdent les gaz à leur entrée dans la cheminée. Cette quantité, qui, dans une bonne combustion pratique, ne doit pas dépasser 10 à 14 0/0, atteint généralement 30 à 40 0/0 de l'énergie calorifique. Dans nombre d'essais nous l'avons vue représenter jusqu'à 50 et même 60 centièmes du combustible consommé.

En présence de ces faits, nous insisterons sur la nécessité de procéder à de fréquentes analyses des gaz brûlés. L'appareil Coquillion, que nous avons décrit plus haut, rendra à cet effet de très grands services ; on peut d'ailleurs, dans ce cas particulier des gaz brûlés, faire usage d'appareils plus simples, puisqu'il suffit de doser l'acide carbonique et l'oxygène.

On sait qu'il est même suffisant de faire la détermination exacte de l'un de ces deux gaz, pour que la composition du gaz brûlé soit connue de façon très approchée.

Les gaz brûlés ne peuvent en effet contenir, outre une quantité de vapeur d'eau plus ou moins variable, que de l'oxygène, de l'acide carbonique et de l'azote, ce dernier gaz existant dans les produits de combustion en proportion à très peu près équivalente à celle dans laquelle il se trouve dans l'air.

Comme la teneur en hydrogène d'un combustible

donné, solide, liquide ou gazeux, ne peut varier que dans des limites étroites, il s'ensuit que les produits brûlés résultant de la combustion, sans excès d'air, auront une composition sensiblement constante, et par suite une densité également constante, densité qui est notablement supérieure à celle de l'air.

Si donc à ce gaz brûlé théorique il se trouve mélangé de l'air, on observera une diminution de densité d'autant plus considérable qu'il entrera plus d'air en excès.

S'appuyant sur ces faits, MM. Meslans et Frère ont imaginé un appareil qui permet de déterminer la composition des mélanges gazeux simples par la détermination de la densité, remplaçant ainsi par une simple pesée les manipulations toujours délicates de l'analyse chimique.

Cette méthode repose sur l'application du principe d'Archimède aux gaz. Nous la décrivons ci-dessous.

Détermination de la densité des gaz appliquée à l'analyse des produits de la combustion. — Si l'on considère un ballon suspendu sous le plateau d'une balance et équilibré dans l'air sec, la perte de poids qu'il éprouve par la poussée de l'air est :

$$p = \frac{0,001293\ \mathrm{VH}}{(1 + \alpha t)\ 760}$$

Si on vient à le plonger dans un gaz sec de densité d, la nouvelle perte de poids est :

$$p' = \frac{0,001293\ \mathrm{VH}'}{(1 + \alpha t')\ 760} \times d$$

L'équilibre est rompu et, pour le rétablir, il faut mettre dans un des plateaux un poids $\mathrm{P} = p' - p$.

On obtient pour d une expression très simple si $H = H'$ et $t = t'$.

On a alors :

$$P = \frac{0{,}001293\ VH}{(1 + \alpha t)\ 760}(d - 1)$$

Avec un seul ballon il est impossible de réaliser ces conditions, et la plus légère variation de t ou H conduit à des erreurs considérables, plus grandes que P, si la densité est trop voisine de celle de l'air.

MM. Meslans et Frère ont tourné cette difficulté en employant deux ballons identiques (*fig.* 50), suspendus aux deux plateaux d'une balance. Equilibrés dans l'air, ces ballons sont ensuite enfermés, comme l'indique la figure, dans deux boîtes métalliques plongées elles-mêmes dans un bain d'eau commun qui assure l'égalité de température des deux caisses ; le couvercle ne laisse passer que les fils de suspension. L'une de ces caisses renferme de l'air. L'autre porte à la partie inférieure un long tube de cuivre, bourré de tournure de même métal et immergé dans l'eau de la caisse externe ; ce tube, qui vient déboucher au dehors, sert à l'introduction du gaz à étudier, qui prend ainsi exactement la température du bain.

L'égalité de température de l'air et du gaz est donc assurée, ils sont tous deux soumis à la même pression, celle de l'atmosphère.

La formule (A) est donc applicable, et la valeur de d est :

$$d = 1 + P\frac{(1 + \alpha t)\ 760}{0{,}001293\ VH}$$

$\frac{760}{0{,}001293\ V} = K$ est la constante de l'instrument.

Elle est déterminée une fois pour toutes et l'expression de la densité devient :

$$d = 1 + PK \frac{1 + \alpha t}{H}$$

On conçoit qu'il est aisé d'établir une table à deux entrées donnant les valeurs de K pour les diverses valeurs de t et H ; la détermination se réduit donc à une simple pesée, afin de connaître P.

Détermination. — L'appareil ayant été réglé dans l'air, une fois pour toutes, on y fait pénétrer le gaz à étudier comme il vient d'être dit, rapidement d'abord, pour chasser l'air, puis en maintenant ensuite un courant lent. — Lorsqu'on veut déterminer la densité du gaz, il suffit de rétablir l'équilibre rompu et de noter le poids P ainsi employé : un thermomètre plongé dans l'eau de la caisse en fournit la température t ; on lit la pression barométrique H au moment où l'on opère, et on recherche sur la table la valeur de K′ correspondante. La densité est donnée immédiatement par le calcul simple.

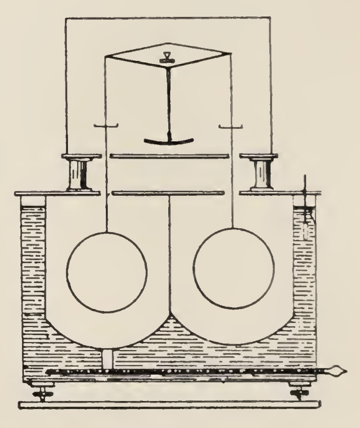


Fig. 50.

$$d = 1 + P.K'$$

Il est facile de renouveler fréquemment cette détermination, à divers moments d'une fabrication (si l'on a eu soin de maintenir le courant de gaz dans l'appareil), et de

suivre ainsi la marche d'une réaction, par les modifications qu'éprouve la composition des gaz qui l'accompagnent.

On peut d'ailleurs donner plus de rapidité aux pesées en employant un dispositif de balance analogue à celui de M. Serrin.

Une chaînette métallique est fixée d'une part sur le fléau, et d'autre part sur un tambour gradué où elle s'enroule, produisant ainsi un poids variable suivant la longueur déployée.

Les ballons sont en verre ou bien en cuivre doré ; leur capacité est d'environ 1 litre ; bien que la forme cylindrique permît de réduire davantage le volume des caisses et par conséquent celui du gaz, MM. Meslans et Frère ont adopté la forme sphérique, qui permet d'obtenir, pour un même volume, un minimum de poids, et offre aussi une plus grande facilité au point de vue de la construction. L'identité des ballons est obtenue sans difficulté à moins de 1/10.000 près et pourrait être poussée plus loin. Les résultats que peut fournir cette méthode pour la densité des gaz sont susceptibles d'une assez grande précision. Nous n'entrerons pas ici dans le détail des applications auxquelles elle peut se prêter : dosage de l'acide carbonique, de l'hydrogène sulfuré, du chlore, de l'acide sulfureux, etc. ; détermination de la densité du gaz d'éclairage, etc.

Nous voulons étudier surtout ici un cas tout particulièrement intéressant, celui de la combustion, et montrer l'application qu'on peut faire de la méthode, que nous venons de décrire, à l'analyse des gaz qui en résultent et par conséquent au réglage de l'air dans les foyers. Les produits gazeux de la combustion renferment en proportions variables, suivant les conditions plus ou moins bonnes

dans lesquelles celle-ci s'est effectuée, de l'acide carbonique, de l'azote et de l'oxygène. Malgré la complexité de ce mélange, la détermination de la densité permet d'y doser avec exactitude chacun de ces éléments.

Prenons le cas le plus général, celui de la combustion de la houille, et considérons une houille de composition moyenne renfermant :

$$\text{Carbone} = 85\ 0/0$$
$$\text{Hydrogène (en excès sur H)} = \frac{0}{8} = 4\ 0/0^{1}$$

Un kilogramme de cette houille contiendra donc 850 grammes de carbone et 40 grammes d'hydrogène. Supposons le carbone réduit, ainsi que l'hydrogène, à l'état gazeux. Les poids du litre de ces gaz à 0° et sous 760 millimètres de pression sont :

Pour C, 1 gr. 071.
Pour H, 0 gr. 089.

D'après cela, 1 kilogramme de houille fournira donc :

800 l. de vapeur de C.
450 l. d'hydrogène.

La combustion du carbone et de l'hydrogène par l'oxygène étant régie par les deux formules :

$$\underset{1\text{ vol.}}{C} + \underset{2\text{ vol.}}{2O} = \underset{2\text{ vol.}}{CO^2} \qquad \underset{2\text{ vol.}}{H^2} + \underset{1\text{ vol.}}{O} = \underset{2\text{ vol. ou liquide}}{H^2O}$$

Pour brûler 1 kilogramme de cette houille, il faudra

[1] C'est-à-dire l'hydrogène total diminué de celui qui peut être brûlé par l'oxygène O, contenu dans la houille ; donc $H\left(1 - \frac{0}{8}\right)$

donc théoriquement :

Pour 800 l. de carbone	1,600 l. d'oxygène	ou	8,000 l. d'air
450 H »	225 l. »	»	1,125 l. »

soit, à très peu de chose près, sept fois moins d'oxygène (7,11) pour brûler l'hydrogène que pour brûler le carbone.

Nous pouvons calculer au moyen de ces données la composition du produit normal de combustion de la houille moyenne par l'air. Celui-ci étant composé de vingt et un volumes d'oxygène et soixante-dix-neuf volumes d'azote, nous aurons :

$$\underbrace{21 \text{ vol. } CO^2 + 79 \text{ vol. Az}}_{\text{provenant de la combustion de carbone}} \quad + \quad \underbrace{\frac{79}{7,11} \text{ vol. Az}}_{\text{résidu de la combustion de H}}$$

La densité d'un pareil mélange est donc :

$$\frac{21 \times 1,526 + 90 \times 0,97}{111} = 1,075.$$

La proportion de CO^2 renfermée dans ce produit normal est :

$$100 \times \frac{21}{111} = 18,9 \text{ 0/0}.$$

Quand la combustion de la houille est parfaite, théorique, les gaz renferment donc 18,9 0/0 d'acide carbonique, le reste du mélange gazeux ou 81,1 0/0 étant constitué tout entier par de l'azote. La densité de ce gaz que nous pourrions désigner sous le nom de produit

normal de la combustion, est alors égale à 1,075. Si donc on laisse pénétrer une quantité d'air supérieure à celle qu'exige cette combustion idéale (un peu plus de 9MC par kilogramme), cet excès d'air traversera le foyer sans changer de composition, enlevant seulement une certaine quantité de chaleur, et se retrouvera mélangé au produit normal de la combustion.

La densité des gaz variera donc avec le volume de cet excès d'air et permettra de l'évaluer, faisant connaître ainsi les proportions d'acide carbonique, d'azote et d'air renfermées dans le mélange.

MM. Meslans et Frère ont dès lors modifié leur premier appareil, de façon à éviter même la pesée et à le transformer en un appareil automatique, indiquant d'une façon continue, par la position d'une aiguille sur un cadran, la proportion d'acide carbonique renfermée dans le mélange gazeux qui le traverse lentement.

Par là même, on connaît celle de l'azote et la quantité d'air admise dans le foyer, en excès sur celui que comporte la combustion théorique. Nous n'entrerons pas dans les détails de cet appareil, dans lequel la dessiccation du gaz est également supprimée.

L'appareil est gradué en centièmes d'acide carbonique. De la formule que nous avons établie nous tirons :

$$P = (D - 1) \frac{1}{K}.$$

Les poids P sont proportionnels à (D — 1), proportionnels donc à la quantité de produit normal (densité 1,075) renfermée dans le mélange gazeux, ainsi qu'à la proportion d'acide carbonique contenu dans ce dernier.

Quand cette proportion est 18,9 0/0, D — 1 = 0,075.

La valeur de D — 1, quand le gaz contient $\frac{1}{100}$ d'acide carbonique, est donc $\frac{0,075}{18,9} = 0,00397$.

V étant le volume des ballons, la valeur de P est pour $\frac{N}{100} CO^2$:

$$P = 0,00397 \frac{V}{(1 + \alpha t)} \frac{H}{760} \times N$$

et pour $V = 1^l$, $t = 15^\circ$, $H = 760$.

$$P = 4^{mgr},89 \times N.$$

Dans ce cas spécial de la combustion on peut sans inconvénient négliger les erreurs dues aux variations de température de la caisse et de la pression atmosphérique.

Il suffit parfaitement, en effet, pour bien régler la combustion, d'apprécier exactement, dans le gaz, l'acide carbonique à 1/2 centième près ; les erreurs qui résultent d'une variation de pression de 20 millimètres de mercure en plus ou en moins de 760, de même que d'un écart de température de 10° en plus ou en moins de la température (15°) du réglage, n'atteignent pas ce chiffre, même dans le cas d'une excellente combustion qui fournit des gaz renfermant 14 0/0 environ d'acide carbonique. Il en est de même de la variation de composition des houilles ; un écart de 1/4 du chiffre d'hydrogène ne produit qu'une erreur de 1/700 CO^2.

On voit donc qu'une graduation ainsi établie, et dont l'intervalle entre chaque division correspond à un poids de $4^{mgr},89$, indiquera la proportion d'acide carbonique

renfermée dans les gaz de combustion, à moins de un demi-centième d'acide carbonique près, même avec des écarts de 20° pour la température, et de 40 millimètres de mercure pour la pression.

46. — Détermination de la chaleur entraînée par les gaz brûlés. — L'appareil dont nous venons de parler peut servir en même temps à la détermination de la chaleur entraînée par les gaz brûlés. Cette quantité de chaleur est évidemment fonction du volume des gaz et de la différence $T - t$ des températures qu'ils présentent à leur entrée à l'état d'air et à leur sortie des appareils de chauffage.

Cette quantité de chaleur perdue augmente donc à mesure que les excès d'air deviennent de plus en plus grands ; d'où il résulte que la densité des gaz de combustion peut nous permettre d'évaluer la quantité de combustible ainsi consommé en pure perte.

Considérons 1 kil. de houille moyenne renfermant 850 grammes de carbone et 40 grammes d'ydrogène combustible.

Le volume gazeux résultant de la combustion théorique de cette quantité sera 8,900 litres du mélange que nous avons désigné sous le nom de produit normal de combustion ; sa densité étant 1,075, son poids sera 12 kil. 46.

En attribuant à ce gaz la chaleur spécifique de l'air, la quantité de chaleur entraînée par ceux-ci est :

$$12,46 \times 0,237 \times (T - t) = 2,95 \times (T - t).$$

D'autre part, la chaleur développée dans la combustion de 1 kilo de cette houille sera, d'après les données ther-

miques :

$$\text{C amorphe} + O^2 = CO^2 + 97 \text{ cal.}$$
$$H^2 + 0 = \text{HO liquide} + 69 \text{ cal}$$

Pour 850 g. C 6,800 cal.
Pour 40 g. H 1,380
Ensemble 8,180 cal.[1]

La vapeur d'eau produite par la combustion de 40 grammes d'hydrogène, qui ne se condense qu'après sa sortie des appareils, entraîne avec elle une quantité de chaleur égale à 5 calories par gramme d'hydrogène brûlé ; mais cette perte est indépendante de l'excès d'air, il n'y a donc pas lieu de la faire figurer dans nos calculs.

La perte par les gaz fixes, rapportée à 100 parties de combustible, est donc égale à :

$$100 \times \frac{2{,}95\,(T - t)}{8{,}180} = 0{,}036\,(T - t)$$

dans le cas idéal d'une combustion parfaite, c'est-à-dire dans les cas où les gaz renferment 18,9 0/0 de CO^2.

Si la combustion a été au contraire effectuée avec deux, trois, quatre fois le volume d'air nécessaire, les pertes seront à très peu de chose près égales à deux, trois, quatre fois cette valeur, en même temps que la proportion d'acide carbonique contenue dans ces gaz sera deux, trois, quatre fois plus petite.

Pour chaque valeur déterminée de $T - t$, la perte

[1] Ce chiffre est légèrement différent de la quantité de chaleur réellement dégagée, comme l'ont montré MM. Scheurer Kestner et Meunier Dolfus; mais l'erreur est sans importance pour des indications de cet ordre, purement relatives; les pertes totales varient, d'autre part, avec d'autres coefficients : rayonnement, etc., impossibles à déterminer avec exactitude. Ce calcul n'est fait d'ailleurs que pour faire ressortir les pertes considérables résultant du mauvais réglage de l'air et les déterminations exactes de ces pertes n'ont, croyons-nous, aucun intérêt.

d'énergie calorique sera donc aisément déduite de la proportion de CO^2 renfermée dans le gaz, par conséquent des indications fournies par l'appareil.

D'une manière générale, CO^2 étant indiqué en centièmes par l'appareil, on a la perte pour m divisions :

$$N = 0{,}036 \times \frac{18{,}9}{m} (T - t).$$

Le tableau ci-joint permet d'évaluer cette perte en fonction de l'air en excès et de voir aussi dans quelle proportion s'accroît la déperdition de chaleur à mesure que diminue la proportion d'acide carbonique ; il montre quel intérêt s'attache au réglage de l'admission de l'air dans les foyers.

Ainsi qu'il ressort de l'examen de ce graphique, pour une valeur de $T - t$ égale à 300°, la perte d'énergie calorifique atteint 32 0/0 quand la teneur en acide carbonique descend à 6 0/0 et dans un très grand nombre d'usines, cette proportion d'acide carbonique est un maximum.

Nous avons maintes fois trouvé 4 et même 3 0/0 de CO^2 ; la perte alors dépasse 50 0/0 pour une valeur de $T - t$ inférieure même à 250°.

Dans le cas des fours où la température est très élevée et où les gaz sortent souvent à plus de 500°, ces pertes peuvent prendre des valeurs plus grandes encore.

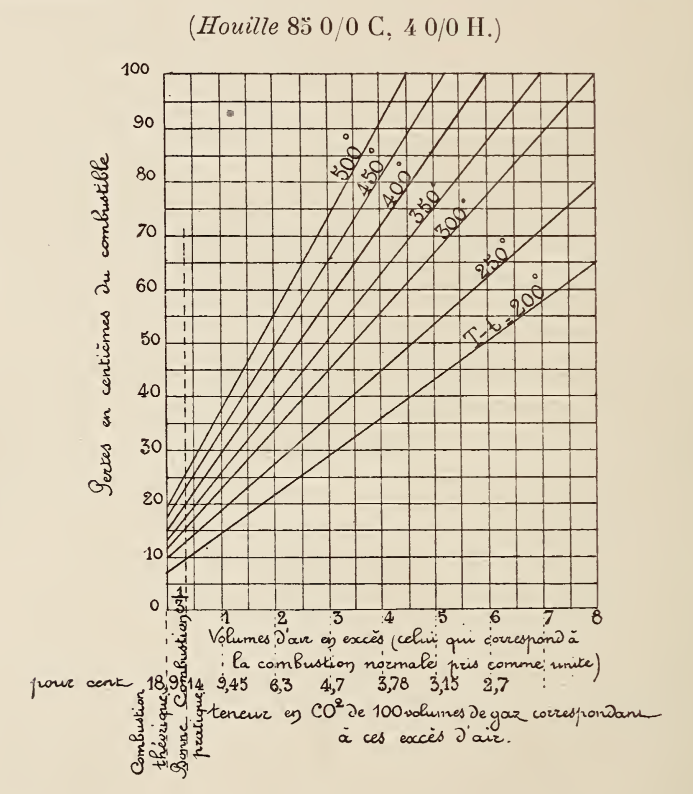
Une bonne combustion pratique, qui correspond à une teneur de 14 0/0 d'acide carbonique, ne produit au contraire qu'une perte de 10 à 15 0/0.

La détermination de la densité des gaz de combustion fournit donc le moyen de doser l'acide carbonique, d'évaluer l'excès d'air ainsi que la perte de chaleur qui en est le résultat.

Par ces indications, elle permet de régler avec sûreté l'admission de l'air, suivant les conditions variables du tirage ou de l'état du combustible qui se présentent aux

Chaleur entraînée par les gaz fixes. Pertes de combustible correspondant à la teneur des gaz en CO^2 *rapportées à* 100 *p. de combustible.*

(*Houille* 85 0/0 C, 4 0/0 H.)



diverses périodes d'une combustion, et de réaliser ainsi une économie de combustible bien souvent supérieure à 25 0/0.

47. — Détermination de la température des fours. — Il est du plus haut intérêt, au point de vue de

la conduite régulière d'un four et par suite de la régularité du travail qu'on y opère, de pouvoir déterminer à chaque instant, ou du moins pendant les diverses phases du travail, quelle est la température que possède le four.

Un nombre infini de pyromètres ont été inventés, reposant sur les principes les plus variés, et malheureusement il faut reconnaître que la plupart ne peuvent recevoir d'application sérieuse.

C'est ainsi qu'après avoir employé d'une manière générale le pyromètre à argile de Wedgwood on a essayé et finalement rejeté les pyromètres métalliques, puis le pyromètre calorimétrique de Régnault plus ou moins modifié par Fischer, Weinholt et Wilson.

Pour la même raison — défaut de comparabilité entre les indications fournies par un appareil, — on a délaissé le pyromètre électrique de Siemens. Parmi les pyromètres susceptibles de fournir des renseignements sensiblement exacts, nous citerons celui de MM. Boulier frères et de Saintignon, et le pyromètre électrique de M. Lechâtelier.

Le pyromètre Boulier et de Saintignon est un appareil calorimétrique reposant sur le principe suivant :

Un courant d'eau circule dans le milieu dont on veut déterminer la température, avec une vitesse et une pression constantes. Le débit étant ainsi uniforme, la température de l'eau s'élèvera d'autant plus que le milieu sera à une température plus élevée. Il suffit donc de mesurer l'accroissement de température de l''eau, ce qu'on obtient par la lecture des indications données par deux thermomètres placés l'un à l'entrée, l'autre à la sortie du courant.

Le reproche le plus grave qu'on puisse faire à cet

appareil, c'est que, après un certain temps de fonctionnement, le tube de circulation d'eau se recouvre intérieurement d'incrustations provenant du dépôt des matières tenues en dissolution dans l'eau et que la chaleur précipite. On remédie à cet inconvénient en faisant usage d'eau de pluie filtrée, ou mieux d'eau distillée.

En outre, quand le four, dont on veut déterminer la température, fonctionne avec une flamme réductrice, il se produit, à l'extérieur du tube, un dépôt de matières charbonneuses, qui fait varier la conductibilité du métal et vient fausser les résultats.

Dans la pratique, on écarte cette cause d'erreur, en entourant d'une gaine en poterie le tube de circulation d'eau. Cette manière de faire a, en outre, l'avantage de faire indiquer à l'appareil ce que nous appellerons la température moyenne du four, en ce sens qu'elle permet d'éviter les variations brusques dues à des « coups de chalumeau ».

48. — Pyromètres de Le Châtelier. — Le pyromètre Le Châtelier est basé sur la mesure de l'intensité d'un courant produit par l'échauffement de la soudure d'un couple thermo-électrique, réuni par un conducteur double à un galvanomètre. Le couple est composé de platine rhodié.

Cet appareil permet de prendre des températures périodiquement aux différentes phases du travail d'un four avec des erreurs ne dépassant pas 25° centigrades. Ce sont là des indications précieuses que l'on obtiendra avec ce pyromètre.

Malheureusement cet instrument n'est pas assez robuste pour pouvoir être mis entre les mains d'un ouvrier, et en outre il ne peut servir à suivre d'une façon con-

tinue les variations de température. En raison des modifications que les températures élevées apportent dans la structure des métaux, la conductibilité varie assez rapidement et on doit procéder fréquemment à une graduation nouvelle.

Un seul intermédiaire peut transmettre à l'observateur l'état calorifique d'un foyer sans éprouver d'altération, c'est la matière vibrante : l'éther. Il faut donc absolument, dans la construction d'un pyromètre robuste, utiliser les radiations lumineuses des corps incandescents, c'est-à-dire chercher simplement à remplacer l'œil, comme appareil de mesure, par un appareil qui soit plus précis, tout en restant assez simple. C'est sur ce principe qu'est basée la lunette de MM. Mesuré et Nouël, dont nous donnons plus loin la description, laquelle peut servir seulement à constater soit l'invariabilité, soit le sens de variation de température sans qu'on puisse espérer obtenir une précision de plus de 50°.

Pyromètre optique. — Poursuivant ses recherches sur les hautes températures, M. Le Châtelier a étudié un nouveau pyromètre basé sur la mesure de l'intensité absolue d'une radiation déterminée, émise par le corps incandescent. Il ne tient pas compte — après en avoir reconnu le peu d'influence — des différences de pouvoir émissif des divers corps pour une même température ; d'ailleurs, dans la pratique, les corps se comportent généralement comme s'ils avaient le même pouvoir émissif, puisqu'ils sont renfermés dans une enceinte sensiblement en équilibre de température avec eux.

Le photomètre (*fig.* 51) que M. Le Châtelier a adopté pour la construction de son nouveau pyromètre est celui de M. Cornu, qui permet de comparer l'image réelle du

corps incandescent et celle de la flamme d'une petite lampe à pétrole.

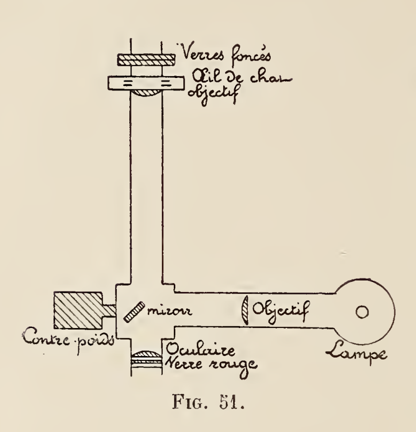


Fig. 51.

Les intensités sont ramenées à l'égalité par l'interposition d'un certain nombre de verres, nuance fumée, et ensuite par l'ouverture variable d'un diaphragme, dit « œil-de-chat », placé contre l'objectif.

Un verre rouge placé devant l'oculaire permet de n'examiner que des radiations monochromatiques.

Le pouvoir absorbant de chacun des verres est mesuré au moyen du diaphragme « œil-de-chat » en visant une même source lumineuse, avec ou sans l'interposition du verre coloré. Les intensités lumineuses sont rapportées à celle de la partie brillante d'une lampe étalon à acétate d'amyle.

La graduation de l'instrument a été obtenue en mesurant l'intensité lumineuse d'une petite sphère de palladium fondue sur la soudure d'un couple thermo-électrique. On a fait deux graduations : l'une qui s'applique à tous les corps renfermés dans une enceinte de température uniforme, l'autre aux corps placés à l'air libre, pourvu que leur pouvoir émissif soit voisin de celui du palladium (platine, argile, etc.).

Il résulte d'expériences faites aux usines du Creusot qu'il est facile, avec ce pyromètre, d'obtenir des mesures de température concordant à 10° près, ce qui est suffisamment précis pour des essais industriels. Cet appareil

(auquel manque la sanction de la pratique) semble donc convenir parfaitement lorsqu'il s'agit de régler empiriquement la marche d'une opération métallurgique, céramique ou toute autre semblable. Ses indications restent absolument comparables entre elles.

Lunette pyrométrique de MM. Mesuré et Nouël. — La détermination courante de la température des corps incandescents s'obtient, en général, par l'appréciation de leur nuance lumineuse, en appliquant l'échelle de Pouillet. Le procédé est rapide, mais il manque de précision ; l'observation obtenue est variable pour divers observateurs ou pour le même observateur, opérant à divers intervalles de temps ou dans des usines, différemment éclairées ; cette méthode exige un œil fréquemment exercé.

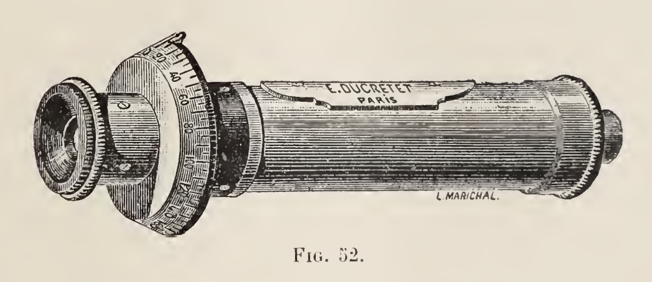


Fig. 52.

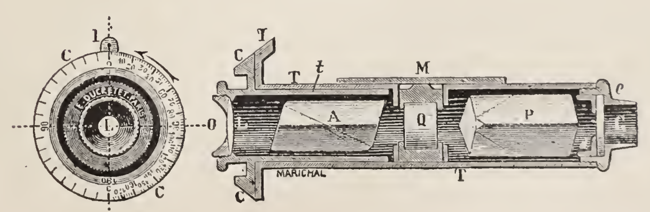


Fig. 53.

La lunette pyrométrique de MM. Mesuré et Nouël écarte ces inconvénients, en ramenant la détermination

des nuances lumineuses à l'observation rapide et pratique d'un phénomène comparable à lui-même en toutes circonstances et susceptible d'être mesuré.

Cette lunette (*fig.* 52 et 53), basée sur les phénomènes de polarisation rotatoire, comprend essentiellement : un polarisateur et un analyseur dont le réglage à l'extinction donne le zéro de la graduation du cercle divisé. Ce cercle divisé en degrés est mobile devant un index fixe. Entre les deux nicols est situé un quartz d'une épaisseur convenable bien calibrée. Ce quartz est taillé perpendilairement à l'axe.

Une lampe vise l'ouverture garnie d'une glace parallèle ou, à volonté, d'un verre diffusant dépoli très doux.

Si l'on examine avec ce polarimètre spécial un corps incandescent, les proportions des divers rayons simples qu'il émet variant avec la température, il s'en suivra que, pour une rotation donnée de l'analyseur, la teinte composée obtenue sera différente suivant cette température et que le passage d'une teinte à une autre se fera pour un angle variable suivant la nuance lumineuse du corps incandescent.

Il suffit d'observer le corps incandescent à travers cette lunette et de faire tourner lentement l'oculaire dans le sens de la graduation de son cercle. On trouve bientôt une position variant entre 20° et 90°, où la teinte perçue passe rapidement du vert au rouge ; cette transition s'opère vers un point de la graduation qui diffère suivant la nuance lumineuse (et par suite la température) du corps incandescent.

Le passage du vert au rouge se produit par une rotation angulaire assez faible de l'analyseur ; entre ces deux couleurs franches, on observe aisément une autre teinte dite de passage, d'une nuance « citron sale ».

C'est cette teinte de passage qu'il faut observer ; c'est à elle qu'on arrête la rotation de l'analyseur ; au chiffre donné sur le cercle par l'observation de cette teinte sensible correspond la température du corps incandescent. Cette température a donc pour mesure le nombre de degrés dont on a fait tourner l'analyseur devant l'index fixe.

Dans les lunettes pyrométriques en service courant, depuis quelques années, aux usines Saint-Jacques, à Montluçon, et qui sont semblables à celles que M. Ducretet construit pour l'industrie, les degrés d'angle observés pour cette teinte de passage correspondent en degrés centigrades aux chiffres ci-dessous :

Degrés du cercle	40°	donnant	900° C.	correspondant	au rouge cerise	Teinte de l'échelle de Pouillet du foyer incandescent
—	46°	—	1 000°	—	— clair	
—	52°	—	1 100°	—	orange foncé	
—	57°	—	1 205°	—	— clair	
—	62°	—	1 300°	—	au blanc	
—	66°	—	1 400°			
—	69°	—	1 500°			

Il peut arriver, dans certains cas, que l'appareil reçoive quelques rayons de lumière blanche diffuse en même temps que les rayons du corps incandescent dont on veut apprécier la température, et les résultats sont alors légèrement faussés ; on obvie à cet inconvénient en prolongeant la lunette par un tube noirci à l'intérieur et plus ou moins allongé. S'il y a dégagement de gaz chauds provenant du four qu'on étudie, il convient de fermer ce tube par un verre placé à l'extrémité.

Les températures inférieures à 900° sont généralement difficiles à apprécier à cause de la faible quantité de lumière perçue dans la lunette. Pour l'observation de ces températures, il convient d'adapter à l'objectif une lentille de grand diamètre qui concentre plus de lumière,

comme dans la disposition représentée sur la figure ; mais, pour les températures plus élevées, on peut même supprimer cette lentille, comme on le fait dans les lunettes employées actuellement.

La monture de la lentille extrême est mobile pour permettre d'atteindre le diaphragme intérieur. La lunette est coupée en T, afin qu'on puisse enlever le quartz, vérifier et mettre la virole à l'extinction par rapport au zéro de la graduation. Les montures sont à vis et guides pour avoir un démontage parallèle et non concentrique afin d'éviter un déréglage.

La graduation gravée en E suivant la longueur de la lunette que découvre le mouvement de l'objectif, à la façon d'un palmer, est établie pour des distances de l'objet visé à l'objectif depuis l'origine jusqu'à $0^{m},50$; cette graduation est tracée d'après la formule connue :

$$\frac{1}{P} + \frac{1}{P'} = \frac{1}{f}.$$

Nous ferons la remarque suivante concernant l'emploi de la lunette pyrométrique. Il est souvent nécessaire d'observer la température de divers métaux, qui pendant leur fusion donnent des vapeurs colorées, rouges, vertes, etc., qui viennent troubler l'observation de la teinte de passage. De même, dans un four chauffé directement par le contact des flammes avec les corps à chauffer, l'observation est souvent entravée par le passage, dans le champ de la lunette, de courants de gaz tantôt réducteurs, tantôt complètement brûlés et dont la nuance lumineuse est par conséquent très variable.

La figure 54 montre le dispositif à employer ; il suffit de plonger dans le bain ou le foyer à observer un tube

de fer ou de poterie T, fermé à un bout, et de regarder, par le bout ouvert, le fond de ce tube avec la lunette pyrométrique.

On a tout le temps d'opérer, et les colorations du foyer ne peuvent gêner l'observation.

Le but que l'on doit se proposer dans l'emploi de la lunette pyrométrique est moins de mesurer les températures que de pouvoir suivre, par des observations comparables entre elles, les variations de température d'un corps ou d'un foyer, ou encore de déterminer un point de repère pour la température qui convient à une opération industrielle et de pouvoir toujours retrouver ce point et le reproduire lors d'une nouvelle opération.

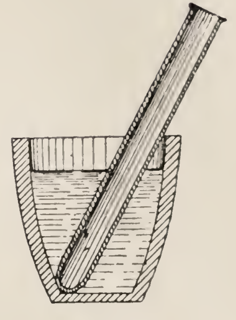


Fig. 54.

A ce point de vue, cet appareil, d'un emploi facile, peut rendre de grands services.

Pyroscopes. — Un procédé pyrométrique beaucoup plus simple que tous ceux dont nous venons de parler consiste à disposer en différents points du four à étudier des substances susceptibles de fondre, et à observer le moment où elles entrent en fusion. Si on connaît le point de fusion de ces substances, on sera renseigné exactement sur la température atteinte à cet instant ; si on ne la connaît pas, on utilisera ces « montres fusibles », non plus pour constater la température absolue atteinte, mais pour servir de régulateur de cuisson et, ultérieurement, d'indicateur pour l'arrêt du four, lorsqu'on aura par expérience établi que cet arrêt doit coïncider avec la fusion de telle ou telle substance.

Naturellement ce procédé ne peut donner d'indications que sur la marche ascendante ou stationnaire de la température ; si elle décroît, les montres fusibles n'indiquent plus rien.

On a d'abord employé comme « montres fusibles » des alliages de différents métaux : argent et or, platine et or, ce dernier alliage étant employé pour la détermination des températures très élevées. Quand cet alliage renferme plus de 15 0/0 de platine (ce qui correspond à 1 160° centigrades), les indications sont douteuses, par suite d'une séparation des métaux par liquation. Aussi a-t-on dû faire usage d'argiles mélangées (suivant le point de fusion qu'on veut leur communiquer) à des substances augmentant ou diminuant leur fusibilité, telles que pegmatite, feldspath, borax, sable, craie, etc.

On emploie assez fréquemment des montres fusibles ou pyroscopes, dont le point de fusion a été déterminé par comparaison avec les meilleurs appareils pyrométriques; on en forme des séries dont le point de fusion de chacun des termes est inférieur de 25° à 30° à celui du terme qui le suit immédiatement.

Avec ces pyroscopes, il est facile de reproduire une opération dont on connaît la température limite. Il suffit de placer dans le four deux montres consécutives de la série, la première présentant la température qu'il faut atteindre, la seconde indiquant la température qu'il ne faut pas dépasser.

Si l'on tient compte, d'autre part, du temps qui s'écoule entre la fusion de ces deux montres fusibles, et qu'on fasse en sorte que ce facteur très important reste toujours constant, on peut tirer de l'emploi des pyroscopes des indications très utiles, sur la marche des fours.

Il n'y a qu'un inconvénient à reprocher à ces pyros-

copes, c'est qu'ils ne peuvent donner aucun renseignement sur les à-coups si fréquents qui se produisent pendant le chauffage. Ces variations de température ne peuvent d'ailleurs être indiquées que par des appareils qui seraient placés à demeure dans le four, et malheureusement aucun de ceux dont nous venons de parler ne remplit les conditions voulues pour répondre à ce *desideratum*. Ils se faussent tous plus ou moins après un séjour prolongé, au contact des gaz dont la température très élevée et la composition excessivement variable agissent énergiquement sur les propriétés des substances dont sont composés les pyromètres.

Aussi pensons-nous qu'il est préférable de faire la détermination, non des conditions dans lesquelles fonctionne le four lui-même, mais des causes diverses qui peuvent modifier son allure : tirage, température des gaz combustibles et des produits de la combustion, vitesse d'évacuation de ces gaz, etc. Il devient alors possible d'employer pour ces déterminations — faites à des températures relativement basses — des manomètres, pyromètres, etc., enregistreurs, tels que ceux qui sont fournis par la maison Richard, appareils dont le bon fonctionnement nous est assuré par la longue expérience que personnellement nous en avons faite.

CHAPITRE III

VERRES ORDINAIRES

§ 1. — Verre soluble

Depuis longtemps on connaît les combinaisons solubles de la silice avec la potasse ou la soude. Déjà, au XVIIe siècle, l'alchimiste Glauber indiquait le mode de préparation d'une de ces combinaisons, qu'il appelait « liqueur des cailloux ».

En 1825, Fuchs, de Munich, étudia les propriétés d'une autre de ces combinaisons à laquelle il donna le nom de « verre soluble » ; mais ce ne fut qu'à la suite des travaux de Liebig et de Kuhlmann que l'on trouva à cette matière des emplois nombreux, pour le durcissement des pierres, des plâtres, pour les usages en teinturerie, etc.

49. — Fabrication. — Très généralement, le verre soluble est préparé avec de la soude, le prix élevé de la potasse la faisant rejeter pour cette fabrication.

Le verre soluble peut être obtenu par voie sèche et par voie humide.

Voie sèche. — La maison Kuhlmann, de la Madeleine-

les-Lille, s'est fait une réputation justement méritée dans la fabrication du verre soluble. Suivant la destination du produit, on choisit comme alcali la potasse ou la soude, la potasse étant spécialement réservée pour les produits destinés à la peinture murale.

Le silicate de soude est principalement employé à la préparation des bains pour la fixation des mordants dans les manufactures de toiles peintes.

Kuhlmann emploie comme silice le sable pur qu'on trouve dans les environs de Creil ; la potasse provient du raffinage des salins de betteraves ; quant à la soude, qui est employée à l'état de carbonate, elle est préparée suivant la méthode Leblanc et soumise ensuite à une purification.

M. Kuhlmann fils a imaginé un procédé ingénieux qui donne des résultats très satisfaisants. Il traite les nitrates de potasse ou de soude par le sable, dans des fours à réverbère et obtient ainsi, du même coup, de l'acide nitrique et une masse poreuse qui, suffisamment chauffée, après départ de l'acide azotique, fournit du silicate de soude ou de potasse.

Pour la préparation de verre soluble moins pur, destiné à la silicatisation des matériaux de construction et pour lesquels une des qualités les plus recherchées est le bon marché, on fait usage de matières premières non purifiées.

Une composition fréquemment employée est :

Sable..............	100 parties
Sulfate de soude....	60 »
Charbon	20 »

On fond ce mélange sur la sole d'un four à réverbère à flamme directe. La rapide destruction des parois du four

sous l'action du sulfure de sodium qui se forme tout d'abord est le principal inconvénient du procédé. Il importe de choisir avec soin les matériaux qui entrent dans la construction du four.

Les parois latérales et la coupole sont en grès naturel à grain très fin et bien homogène. Ces grès sont taillés de façon à se présenter à l'intérieur du four perpendiculairement à la direction des couches de stratification.

La sole du four, qui est en matériaux réfractaires, repose sur un lit de sable de 5 centimètres d'épaisseur. En disposant les pierres formant la sole, il faut avoir bien soin de laisser entre elles un espace libre d'environ 2 centimètres, afin d'assurer la libre dilatation.

Pour former la voûte, on dispose, l'un à côté de l'autre, des blocs de grès réfractaire, taillés en arceaux, chacun d'eux s'appuyant des deux côtés du four sur un mur en maçonnerie. Chaque bloc constituant une fraction indépendante peut être remplacé au cours du travail sans interrompre l'opération. Dans cette voûte sont ménagées des ouvertures pour le chargement des matières.

On compte que la fonte d'une charge de 2 250 kilogrammes exige douze heures. Lorsque le produit est complètement fondu, on débouche un trou de coulée, ménagé dans la partie la plus chaude du four, et la matière est reçue sur des plaques en fonte où elle se refroidit.

Pour purifier le silicate brut et le mettre en forme commerciale, on le broie grossièrement et on le met en digestion avec de l'eau sous pression, dans de grands récipients autoclaves en fonte ou en tôle. La liqueur est ensuite amenée dans des réservoirs en tôle où elle se clarifie. Afin de détruire de petites quantités de sulfure de sodium qui la colorent, on traite la liqueur par le chlorure de chaux.

La liqueur claire est ensuite décantée et concentrée jusqu'à 40° ou 50° Baumé, dans des bassines en fonte chauffées à feu nu par les gaz brûlés en retour qui s'échappent du foyer.

Il importe que l'évaporation soit faite sans interruption, sans quoi il se produit à la surface une pellicule assez résistante qui ralentit beaucoup la concentration.

Dans certains cas, on prépare un verre plus siliceux en attaquant le sable comme il vient d'être dit, et en opérant ensuite la dissolution à l'aide de liqueurs alcalines sous pression.

Voie humide. — M. Kuhlmann emploie pour cette fabrication le silex pyromaque ou pierre à fusil, qui abonde dans la craie des environs de Lille.

Ces silex sont d'abord portés à la température rouge, puis étonnés par immersion brusque dans de l'eau froide. Cette double opération amène la réduction du silex, en menus fragments, en même temps que leur décoloration par suite de la combustion des matières bitumineuses qui les imprègnent.

Ainsi préparées, les pierres sont placées sur une tôle perforée placée dans un autoclave chauffé à feu nu. On laisse, entre la plaque de tôle et le fond de l'autoclave, un espace de 10 à 15 centimètres afin d'éviter tout contact direct du silex avec le fond de l'appareil. On introduit dans l'autoclave une dissolution de potasse ou soude caustique à 20° Baumé (densité 1,16), et on élève la température jusqu'à obtenir dans l'autoclave une pression de 6 atmosphères que l'on maintient pendant six heures.

On fait alors écouler la solution de silicate, dont la densité oscille généralement entre 1,26 à 1,28 (30° ou 32° Baumé), ce qui est la limite de concentration du silicate

par voie humide. Si on voulait obtenir des solutions plus denses en employant des lessives alcalines de densité supérieure à 1,16, il se précipiterait une grande quantité d'un silicate plus acide insoluble, qui diminuerait notablement la teneur en silice de la solution de verre soluble.

Emploi de la farine fossile. — On a essayé de faire usage, pour la préparation du verre soluble, d'une espèce de silice hydratée, relativement pure, dite « farine fossile », qui se trouve en puissants gisements à Ebsdorf, à Oberhohe et à Hützel. On attribue la formation de ces gisements à des dépôts de coquillages ou carapaces d'infusoires, mélangés à d'autres matières parmi lesquelles domine la poussière des fleurs de pin. Cette farine fossile, excessivement poreuse et très légère, a pour composition chimique :

Silice	86,44
Carbonate de chaux	1,31
Peroxyde de fer	1,48
Argile	1,64
Matières organiques	2,31
Eau	6,75
	99,93

Son état de division extrême la rend très facilement attaquable par les lessives alcalines. Ainsi des lessives d'une densité 1,2, agissant sous une pression de 3 atmosphères, donnent, au bout de trois heures, un verre renfermant 3 parties de silice pour une partie d'alcali, résultat qui serait loin d'être atteint avec le silex.

Pour l'emploi, la farine fossile doit être calcinée à une température très élevée, opération qui est excessivement longue, car la faible densité du minéral le rend extrême-

ment volumineux et fort peu conducteur de la chaleur. En raison de cet inconvénient, l'emploi de cette matière fut presque complètement abandonné jusqu'en ces derniers temps.

La question a été reprise par M. Capitaine à la suite de la mise en pratique de nouveaux procédés de calcination, dus à MM. Grüne et Hagemann, procédés qui ont abaissé considérablement le prix de revient de la farine fossile calcinée.

Dans un réservoir autoclave muni d'agitateurs et rempli aux 2/3 de lessive alcaline de densité 1,22 à 1,24, M. Capitaine ajoute une quantité de farine calcinée telle que, pour une partie de soude hydratée, il y ait 2,8 parties de farine. On élève la température jusqu'à obtenir une pression de 3 atmosphères qu'on maintient pendant trois heures. Au bout de ce temps, la silice est complètement dissoute, et la liqueur se clarifie très rapidement. S'il y avait excès de farine ou cuisson suffisante, la couleur du liquide serait d'un blanc rougeâtre, et la clarification ne se ferait que très lentement.

Il importe de ne pas employer de lessive trop dense, sans quoi on s'exposerait à obtenir un verre trop concentré, qui ne se clarifierait qu'avec une extrême lenteur.

On peut combiner l'emploi de la farine fossile avec celui du flint, en préparant d'abord un verre très alcalin, que l'on transforme ensuite en silicate neutre, en le mettant en contact avec la farine dans un autre appareil.

50. — Caractères et applications du verre soluble. — Le verre soluble en solution, mélangé à de la chaux, donne une pâte visqueuse qui, en se desséchant, durcit très peu et tombe en efflorescence sous l'action d'un carbonate alcalin.

La magnésie, l'oxyde de zinc, agissent énergiquement sur le verre soluble en donnant naissance à des silicates et à un carbonate alcalin.

Les chlorures, les carbonates alcalins précipitent le verre soluble en un silicate acide.

Le carbonate de chaux mis en contact avec le verre soluble se comporte de façon sensiblement identique à la chaux caustique ; il y a élimination de l'alcali, potasse ou soude, mais l'acide carbonique reste en combinaison avec le silicate de chaux. Il en résulte un silico-carbonate de chaux hydraté qui a la propriété de perdre peu à peu son eau d'hydratation et d'acquérir la dureté des ciments hydrauliques.

On a utilisé cette propriété du verre soluble pour l'employer comme préservatif des matériaux de construction. On emploie le verre soluble soit par trempage des pierres avant la pose, soit en application au pinceau sur les murailles. Dans ce dernier cas, on complète généralement la silicatisation, qui ne pourrait être que superficielle, par l'application d'un enduit dans la composition duquel on fait entrer du verre soluble.

On peut donner à cet enduit les colorations les plus diverses par l'addition d'un composé minéral coloré.

Les résultats qu'on obtient sont très satisfaisants ; une application faite par nous, il y a dix ans, nous en a donné la preuve.

L'enduit est obtenu en mettant en suspension dans une solution de silicate de soude à 20° Baumé une poudre composée de :

Carbonate de chaux...	50 0/0
Argile................	50 0/0

Le silicate et la poudre sont mélangés dans les proportions de :

Un litre de silicate à 20° B.
1/2 kg de poudre.

Mode d'application. — Il ne faut passer la peinture sur la pierre que quand celle-ci a perdu toute son eau de carrière ; ceci, afin que le pouvoir absorbant soit le plus grand possible. On donne trois couches distancées l'une de l'autre d'une journée au moins. La teinte doit être appliquée très abondamment en croisant, comme pour la peinture à l'huile, et on doit ressuyer de suite dans le sens contraire de la croisure à l'aide d'un balai à coller le papier.

Si l'on n'appliquait pas la teinte jusqu'à ce que le fond n'en absorbe plus, la peinture « farinerait » au toucher. Si on ne ressuyait pas de suite dans le sens contraire de la croisure, la peinture serait nuancée à cause de son inégale répartition sur la pierre.

Si, dans l'application de la peinture, on se trouve à proximité de boiseries peintes à l'huile ou d'un vitrage, on les préserve en les graissant avec du saindoux.

Il faut recommander à l'ouvrier chargé du travail d'agiter fréquemment la peinture, afin de répartir uniformément la poudre dans le liquide.

Fluosilicate. — Dans le même ordre d'idées, pour la préservation des constructions en matériaux de qualité inférieure, on combine quelquefois l'emploi d'un silicate avec celui d'un fluorure, tel que le fluorure d'aluminium acide.

Ici, il y a décomposition du carbonate de chaux avec

formation d'un fluosilicate double de chaux et d'alumine insoluble et très résistant.

L'application se fait au pinceau et généralement on passe trois couches à une journée d'intervalle. L'ouvrier devra se garantir les mains, car le fluosilicate est acide et produit, par un contact prolongé avec la peau, une sécrétion abondante de sueur.

On a également, et avec un grand succès, fait usage du verre soluble pour la consolidation et le durcissement des ciments et mortiers hydrauliques. Voici à ce sujet quelques faits observés par M. Kuhlmann. La dissolution du silicate de potasse ou de soude employée à former une pâte ferme avec de l'alumine, du silicate d'alumine en gelée et surtout avec de la magnésie caustique ou carbonatée (magnésie blanche), donne des composés correspondants aux silicates naturels : feldspath, schiste talqueux, magnésite, etc., lesquels, constitués à l'état d'hydrate, se contractent par le repos et la dessiccation lente, deviennent fort durs, demi-transparents et difficilement attaquables par l'eau.

La potasse, ou la soude, entre dans la constitution de ces composés de façon qu'ils présentent une certaine analogie avec les pâtes de porcelaine alumineuses ou magnésiennes. Ces pâtes, moins sujettes à se fendiller par une addition de sable fin ou toute autre matière non plastique, permettent de façonner des objets de moulage fort durs et inaltérables à l'air.

En associant la chaux délitée aux silicates hydratés dont on vient d'indiquer la préparation, on produit des silicates à trois bases qui constituent des ciments jouissant essentiellement du caractère d'hydraulicité.

Si, au lieu d'employer un mélange de chaux vive et de magnésie calcinée ou hydrocarbonatée (magnésie

blanche), on pétrit certaines dolomies, ou mieux des craies dolomitiques calcinées et pulvérisées, avec une dissolution de silicate de potasse ou de soude, en y incorporant du sable ou de la pouzzolane, on obtient des ciments hydrauliques excellents. Ces ciments résistent le plus souvent à l'air comme à l'eau et peuvent servir dans toutes les circonstances, mais ils paraissent particulièrement propres aux travaux hydrauliques et capables de résister, mieux que les ciments calcaires, à l'action de l'eau de mer.

M. Vicat fils, partant de cette donnée que le silicate magnésien n'est pas, comme le silicate de chaux, attaqué par les sels de magnésie, a proposé de composer des mortiers, pour les travaux à la mer, avec de la magnésie calcinée et des pouzzolanes artificielles, c'est-à-dire des arènes ou des argiles calcinées.

Le haut prix de la magnésie, soit qu'on la retire des dolomies, ou, comme l'a proposé M. Vicat, des eaux de mer des marais salants, n'a pas permis de s'assurer par des expériences en grand de l'efficacité de ce procédé.

Ayant reconnu que les silicates de magnésie et de chaux hydratés ne sont pas entièrement insolubles dans une dissolution de chlorure de sodium, mais que cette insolubilité devient plus grande lorsqu'on opère sur des silicates doubles ou triples de chaux et de magnésie, de chaux, de magnésie et d'alumine, on a été conduit à faire entrer directement les dolomies calcinées dans la composition des matières en leur donnant, par une addition de silicates alcalins, des caractères de consolidation que ne donnerait certainement pas l'addition de pouzzolane artificielle.

Dans la direction de ces essais, on avait pour but, non seulement de mettre à profit le peu de solubilité des sili-

cates magnésio-calcaires dans l'eau de mer, mais surtout d'utiliser certaines propriétés particulières des silicates alcalins qu'on vient de faire connaître.

La plupart des sels que contient l'eau de mer doivent concourir à protéger contre toute corrosion nos constructions maritimes, lorsqu'il entre dans la composition du mortier des silicates alcalins solubles ou que ces constructions sont revêtues de ciments imprégnés d'un excès de ces silicates.

D'abord, le chlorure de magnésium et le sulfate de magnésie, étant décomposés, doivent constituer à la surface des travaux hydrauliques une couche de silicate de magnésie; le sulfate de chaux doit former, au contact du silicate de potasse ou de soude, du silicate de chaux, tous composés difficilement attaquables par l'eau de mer. Reste l'action du sel marin; à l'égard de cet agent d'altération, on a fait une observation, qui n'est pas sans importance. C'est que ce sel en dissolution affaiblie jusqu'à la proportion dans laquelle il se trouve contenu dans l'eau de mer précipite lentement la silice en un composé siliceux, non encore déterminé, de silicate de potasse ou de soude. Cette précipitation est immédiate dès que la proportion de sel marin devient plus considérable, qu'elle s'élève à 5 0/0 par exemple. — Désirant s'assurer dans quelles limites la grande affinité de la magnésie pour la silice peut être utilisée dans l'emploi des produits naturels, on a soumis à la silicatisation un grand nombre de chaux magnésiennes résultant de la calcination de diverses dolomies. Les meilleurs résultats ont été obtenus avec les dolomies de Traverselles (Piémont), les craies dolomitiques d'Igornay, près Autun, les craies dolomitiques de Beynes (Seine-et-Oise). — La présence dans les dolomies d'un excès de chaux et d'un

peu d'argile paraît favorable; mais, pour obtenir un bon raffermissement, il est utile de laisser bien s'hydrater la dolomie calcinée avant d'y ajouter la dissolution siliceuse. — En envisageant la silicatisation des mortiers en dehors de l'influence de la magnésie, on a constaté, par des expériences nombreuses, que l'on obtient de bons mortiers hydrauliques en associant à la chaux grasse, non seulement du sable et des silicates alcalins, mais aussi un peu d'argile. Les mortiers composés de trente parties de chaux grasse, cinquante de sable, quinze d'argile non calcinée et cinq de silicate de potasse en poudre, ont permis de construire des citernes parfaitement étanches.

Ainsi, avec une dépense de 5 0/0 de silicate alcalin sec ou leur représentant en dissolution, les mortiers acquièrent déjà une grande dureté. On fait d'ailleurs varier ces quantités suivant le degré d'hydraulicité qu'on veut obtenir.

En dehors de ces applications du verre soluble à la conservation des matériaux de construction, on a trouvé à ce produit des applications très rationnelles dans lesquelles il rend de réels services.

C'est ainsi qu'en chirurgie on emploie avantageusement le silicate de potasse pour la contention des fractures.

Mêlé avec le sulfure d'antimoine, le verre soluble donne une matière foncée très dure et susceptible de prendre un beau poli. Avec les limailles de fer, on obtient une masse gris foncé très résistante, de même qu'avec la limaille de zinc.

Dans la fabrication des toiles peintes, on remplace fréquemment l'alun par le verre soluble. Dans la teinture du coton on en fait usage comme apprêt et comme mordant; il suffit, pour opérer le dépôt de silice, de passer

dans un bain faiblement acide le coton préalablement imprégné de silicate.

Une application intéressante est celle qu'on en a faite pour le lavage de la laine. Soumise pendant quelques minutes à l'action d'une solution faible de verre soluble neutre, à une température de 50° environ, triturée dans ce bain, puis lavée à l'eau tiède, la laine se trouve être complètement blanchie et exempte d'odeur, tout en restant parfaitement douce au toucher.

Même après un contact de plusieurs jours avec le silicate, la laine conserve toutes ses qualités de douceur et de souplesse.

Le silicate de soude est employé, surtout en Allemagne et en Amérique, à la fabrication des savons d'huiles de palme et de coco. Il rend ces savons plus alcalins et plus durs.

Employé pour le blanchissage du linge, le silicate de soude donne des résultats de beaucoup supérieurs à ceux qu'on obtient par les procédés habituels.

Quelle que soit la pureté des produits chimiques employés dans le blanchissage, on n'est jamais assuré d'obtenir un nettoyage parfait, même si les cristaux de soude sont très blancs, le savon très riche en corps gras et les sels caustiques de soude sans traces de sulfures.

Souvent le linge, ou bien reste roux, ou bien se couvre de grandes taches jaunes, ou encore conserve toutes les maculatures préexistantes. Pour corriger ces défauts, le blanchisseur augmente la dose de causticité, il allonge le temps de l'ébullition, et, si parfois il arrive au but, c'est au détriment du linge qui est brûlé.

Il est reconnu que le linge s'use beaucoup moins vite dans les campagnes où l'on coule encore les lessives avec des cendres. Aussi tous les mécomptes éprouvés sont-ils

généralement imputés aux produits chimiques mis en œuvre, tandis qu'ils doivent être attribués à la nature des eaux employées. Les unes sont réputées de bonne qualité, d'autres au contraire sont rejetées comme impropres au blanchissage. Cette distinction doit disparaître. Dans les eaux communes, il n'y a que les sels de chaux et de magnésie qui aient une influence, les sels des autres bases sont en trop faible proportion.

Le bicarbonate de chaux se dédouble à l'ébullition ou par l'addition de soude et forme un précipité qui adhère au linge : agissant comme une laque, il fixe aux tissus la couleur jaunâtre que possède la solution alcaline où il prend naissance ; les taches de lessive résistent aux lavages subséquents ainsi qu'aux agents oxydants. Le sulfate de chaux agit de même ; il est du reste ramené à l'état de carbonate par l'addition du sel de soude. On connaît enfin l'action des sels de chaux et de magnésie sur les savons alcalins qu'ils décomposent.

Lorsqu'on emploie de l'eau distillée, ou simplement purifiée, les accidents signalés plus hauts ne se produisent pas. Mais, dans le blanchissage, on ne peut recourir aux procédés industriels d'épuration, qui sont trop compliqués ; il faut un moyen plus simple : on rend inoffensive une eau calcaire en l'additionnant d'un silicate alcalin, dont la qualité essentielle est d'être entièrement soluble dans l'eau.

On l'obtient aisément en mélangeant à du carbonate de soude anhydre en poudre 10 à 20 0/0 d'une solution saturée de silicate de soude NaO, $^2SiO^2$. Le carbonate tendant à former l'hydrate NaO, $CO^2 + 10HO$ absorbe l'eau de la solution et devient pour ainsi dire le support du silicate.

Sous cette forme, ce sel est aisément transportable et

conserve sa solubilité, tandis qu'aucun silicate obtenu directement par fusion n'est intégralement soluble.

Au sein de la lessive, le silicate donne avec les sels de chaux et de magnésie un précipité floconneux qui se dépose très vite, n'est nullement adhésif et devient à l'ébullition pulvérulent comme du sable.

En solution dans une eau ainsi purifiée, tous les produits lixiviels sont employés utilement ; de plus, comme on ne perd plus ni soude caustique : ni carbonate de soude, on peut calculer les quantités strictement nécessaires de ces produits et éviter ainsi un excès nuisible et coûteux.

L'expérience montre alors qu'il suffit d'une très petite quantité de soude caustique : elle est utile pour amorcer la saponification des corps gras que le carbonate alcalin continue ensuite d'une façon moins énergique et moins dangereuse pour les tissus ; mais on peut s'en passer. Du reste, quand on analyse les principes actifs extraits des cendres de bois, on trouve uniquement du carbonate et du silicate de soude ou de potasse.

Décoration du verre au moyen des silicates solubles. — Nous avons dit que le verre soluble était employé avec succès à la préservation des matériaux de construction. On l'a également appliqué, comme moyen décoratif, à la peinture sur verre et à la peinture à fresque.

Dès 1847, Fuchs avait indiqué au peintre Kaulbach le moyen de préserver ses fresques du musée de Berlin à l'aide de silicate de potasse projeté en pluie fine.

Kuhlmann fit mieux en préparant des silicates colorés qu'il appliquait directement au pinceau sur murailles, sur verre, etc.

Son silicate était diversement coloré avec les oxydes de chrome, de manganèse, les ocres, le bleu et le vert d'ou-

tremer, le jaune de zinc, le cadmium, le minium, le noir de fumée. Ces couleurs finement broyées étaient mélangées en pâte, en proportions convenables, suivant l'effet à rendre, dans une dissolution de silicate de potasse ou de soude.

Ces couleurs, liquides et inaltérables, s'appliquent sur pierre, sur bois et sur verre.

Pour obtenir sur le verre des couleurs et des tons aussi transparents que ceux que nous offrent les couleurs vitrifiables, Kuhlmann emploie des dissolutions plus concentrées que pour les fresques ; pour ces dernières une solution marquant 15° à 20° Baumé est très convenable, tandis que pour le verre il est nécessaire de faire usage d'une liqueur titrant 35°.

Nous ajouterons que, vers 1850, Kuhlmann a fait employer, par des peintres émérites, entre autres par Flandrin, son procédé sur murailles ou fresques et sur étoffes.

§ 2. — Verre à bouteilles

51. — Historique. — La fabrication des récipients en verre date vraisemblablement de l'époque même où le verre fut pour la première fois mis en œuvre. On a dû tout naturellement trouver comme premier emploi de cette substance malléable à chaud, non poreuse après refroidissement, celui d'en faire des récipients destinés à remplacer les vases en argile dans lesquels les anciens conservaient les grains, les liquides, etc.

L'Égypte nous a laissé des bouteilles lisses ou recouvertes d'osier ou de papyrus. De nos jours, ces dernières

sont encore désignées par les Égyptiens sous le nom de « damadjan », d'où nous avons fait dame-jeanne.

Les Romains se servaient de bouteilles pour le vin et de carafes pour l'eau. On a retrouvé dans les ruines de Pompéi des burettes en verre pour l'huile et le vinaigre.

La première verrerie française, pour la fabrication des bouteilles, fut fondée, en 1290, à Quiquengrogne, près La Capelle (Aisne). Cette verrerie fut dotée de chartes lui octroyant le monopole, par les rois de France, François Ier, Charles IX, Henri III et Henri IV.

52. — Compositions vitrifiables. — Nous avons indiqué plus haut, quand nous avons parlé de la résistance du verre à la flexion et à la compression, quelles étaient les qualités que devait présenter une bonne bouteille.

Nous avons dit que pour cette fabrication, d'un produit d'usage courant et dont une des qualités premières doit être le bon marché, on est amené, pour réaliser cette condition, à chercher à proximité de l'usine les matières premières, sable et carbonate de chaux, qu'on emploie telles qu'elles se présentent sans se préoccuper autrement de leur pureté.

C'est ainsi que nous avons pu examiner des bouteilles dans lesquelles entrent des bases, dont la présence nous paraît justifiée moins par les qualités spéciales qu'elles peuvent communiquer au verre, que par leur prix de revient peu élevé.

Cependant nous nous hâterons d'ajouter que cette manière de faire n'est et ne peut d'ailleurs être qu'une exception ; la qualité des produits de nos verreries de la région du Nord et du Lyonnais prouve surabondamment que la plupart des verriers à bouteilles apportent les

plus grands soins dans leur fabrication et que les variations apportées dans la composition de leur verre sont le résultat d'études approfondies et d'essais nombreux.

Une pratique toute spéciale à la fabrication des bouteilles est le « frittage » des matières vitrifiables. Cette opération, qui consiste à faire subir aux matières un commencement de fusion avant leur introduction dans les creusets où seront opérés la fonte et l'affinage, est motivée par ce fait que, dans le but d'abaisser leur prix de revient, les fabricants de verre à bouteille ont l'habitude d'ajouter à leurs compositions une notable quantité de sel marin ou de sels de varechs qui contiennent environ 80 0/0 de sel marin.

Pendant la fritte, ce sel se dessèche, décrépite, devient adhérent à la silice avec laquelle il commence à se combiner, d'où il résulte que son action corrosive sur le creuset est considérablement diminuée.

Le frittage se justifie, tant au point de vue chimique qu'au point de vue physique, par la considération suivante :

Au point de vue chimique, il est acquis que, dans cette opération, 16 0/0 du chlorure de sodium sont décomposés avec formation de silicate de soude et d'acide chlorhydrique, le reste est décomposé pendant la fonte soit par réaction de l'acide sulfurique libre (contenu dans le sulfate de soude ajouté) sur le chlorure, soit par réaction de la vapeur d'eau en présence de la silice, sur ce sel. La vapeur d'eau existant, comme on le sait, en quantité notable dans les produits de la combustion, on comprend facilement comment cette dernière réaction peut se produire.

Depuis quelques années, on a renoncé à l'emploi du sel marin ; le fondant est constitué uniquement par du sul-

fate de soude. Le frittage est également supprimé dans la plupart des verreries. Nous ajouterons que presque partout les fours à creusets ont été remplacés par des fours à bassins.

Le verre à bouteilles est de tous les verres celui dont la composition est le plus variable. On en pourra juger par les quelques analyses ci-après :

	VERRE CLAIR			VERRE D'ÉPINAC	VERRES BLANCS	
	COGNAC	BORDEAUX	CHAMPAGNE			
Silice	62,54	61,75	61,90	59,60	72,30	57,30
Soude	4.73	4,10	6,16	3,20	16,90	5,65
Potasse	0,94	»	1,13	»	Traces	»
Chaux	20,47	19,60	17,95	18,00	8,60	23,50
Magnésie	5,41	4,55	6,38	7,00	»	5,45
Alumine	4,42	7,10	4,41	6,80	1,52	3,52
Peroxyde de fer	1,34	2,70	1,85	4,40	0,28	1,78
Manganèse	»	0,11	»	0,40	0,40	»
Baryte	»	»	»	»	»	1,70
Acide sulfurique	0,10	0,09	0,17	»	»	1,10
	99,95	100,00	99,98	99,40	100,00	100.00

On remarquera la teneur généralement élevée en oxyde de fer et la grande multiplicité des bases, dont les unes sont mises à dessein, et les autres introduites à l'état d'impuretés.

La possibilité d'employer, pour la fabrication des bouteilles de couleur foncée, des matières premières de choix médiocre est — en dehors du prix de revient peu élevé de ces matières elles-mêmes — une circonstance heureuse pour le fabricant.

La multiplicité des bases et surtout la présence de

l'oxyde de fer augmentent la fusibilité et permettent ainsi de réduire la dose d'alcalis.

On est arrivé à faire entrer dans la composition des bouteilles les laitiers des hauts fourneaux (silicates de chaux et de fer) en les additionnant de la quantité convenable de fondants. La meilleure application en ce genre est celle qui a été faite par la société anglaise de Britton, où le four de verrerie, accolé au haut fourneau, reçoit directement le laitier en fusion dont on utilise ainsi la chaleur de fusion.

53. — Fabrication des bouteilles. (Voir pour les fours, planches I, II et II.) — Une équipe de verriers à bouteilles se compose de quatre ouvriers : le souffleur, le grand garçon, le gamin et le porteur.

Les outils principaux sont :

La canne, qui est un tube creux en fer forgé, long de $1^m,80$, d'un diamètre extérieur de 3 centimètres et de 1 centimètre de diamètre intérieur;

L'une des extrémités, le « nez » de la canne, est renflée, l'autre est entourée d'un manchon en bois qui sert de poignée;

Le marbre, pièce en fer, fonte, grès ou bois, bien dressée, dans laquelle sont ménagées des cavités demi-sphériques de différents diamètres;

Le pontil, simple tige de fer.

Quand le verre est à point, qu'il est suffisamment refroidi et amené à la consistance convenable par la « braise » ou « tise-froid », le gamin commence à chauffer la canne en l'introduisant dans un petit ouvreau spécial; puis, il la plonge dans le verre en lui donnant un mouvement de rotation non interrompu. Quand le verre, attaché à la canne, a pris assez de consistance, celle-ci

est prise par le grand garçon qui cueille à nouveau une deuxième et une troisième fois jusqu'à ce qu'il ait fixé à l'extrémité de la canne la quantité de verre ou « paraison » nécessaire à la confection d'une bouteille. (Les figures 55, 56, 57 représentent diverses phases de la fabrication d'une bouteille.)

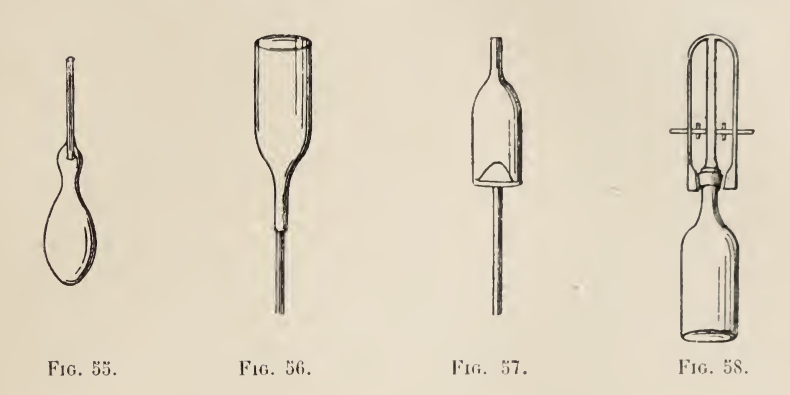


Fig. 55. Fig. 56. Fig. 57. Fig. 58.

Pour bien répartir la paraison autour de la canne, le grand garçon la tourne dans les cavités du marbre, ensuite il la réchauffe à l'ouvreau en faisant tourner la canne sur elle-même afin d'éviter la déformation.

Quand la paraison a atteint la température voulue, le grand garçon souffle dans la canne, tout en donnant à celle-ci un mouvement d'oscillation. La paraison prend alors la forme d'une poire allongée. On la ramollit à l'ouvreau, puis la canne passe aux mains du souffleur qui l'introduit dans un moule en argile ou en bronze, et souffle énergiquement tout en tirant la canne vers le haut, afin que le passage du col au ventre se fasse insensiblement suivant une courbe régulière.

On réchauffe alors le fond de la bouteille et on lui donne ensuite la forme voulue en appuyant au centre avec le pontil préalablement chauffé et garni de verre ;

plus généralement ce fonçage de la bouteille s'exécute mécaniquement dans le moule.

Séparant la canne du col de la bouteille, celle-ci se trouve être maintenant soutenue par le pontil fixé au fond ; il ne reste plus qu'à fixer la bague au col, ce qu'on fait au moyen d'un filet de verre rapporté.

Pour les bouteilles champenoises, dont le col doit être parfaitement cylindrique et bien dressé, on forme la bague avec une pince spéciale se manœuvrant à la main et avec laquelle l'ouvrier écrase et pare le verre en formant ainsi par compression la bague de la bouteille. Cette pince est représentée (*fig*. 58).

Les bouteilles ainsi terminées sont reçues dans une pince ou sabot par le porteur qui les place dans le four à recuire, où elles sont rangées avec ordre, les unes au-dessus des autres. Le four à recuire doit rester à une température supérieure au rouge sombre. Lorsqu'il est entièrement rempli, on le ferme hermétiquement et on le laisse refroidir lentement.

Les fours à recuire modernes sont à feu continu. Ils se composent d'une longue galerie chauffée à l'une de ses extrémités par un foyer à la houille. Une chaîne sans fin, à laquelle sont accrochés des chariots, traverse cette galerie dans toute sa longueur. Les bouteilles placées sur les chariots à proximité du foyer sont ensuite entraînées lentement jusqu'à l'extrémité opposée, où elles arrivent presque complètement refroidies.

Certains de ces fours à recuire sont chauffés au gaz. Cette innovation est due à M. F. Siemens, qui l'a appliquée d'abord à sa verrerie de Dresde, puis à Elbogen.

Pour donner aux bouteilles d'un type déterminé une capacité constante et une forme parfaitement régulière, on fait usage de moules s'ouvrant en deux pièces. Ces

moules, ouverts, sont préalablement chauffés pour recevoir la paraison ; on les referme ensuite et on souffle comme il a été dit plus haut. Plus généralement le soufflage est effectué à l'aide de la pompe Robinet (*fig.* 59). Cette pompe, qui porte le nom de son inventeur, un ouvrier souffleur, est constituée par un cylindre en laiton fermé à l'une de ses extrémités, et dans l'intérieur duquel se trouve un ressort à boudin fixé par l'une de ses extrémités au fond du cylindre, et à l'autre à une sorte de piston en bois, percé d'un trou, qu'une fermeture à baïonnette maintient emprisonné dans le cylindre.



Fig. 59.

La canne étant maintenue verticalement, on place sur l'embouchure le piston de la pompe Robinet, puis par un mouvement brusque donné au ressort, on comprime l'air qui est ainsi injecté dans la pièce à fabriquer.

Nous terminerons ce qui a trait à la fabrication des bouteilles en donnant la description des modifications très ingénieuses apportées à diverses parties de ce travail par M. Houtart, maître de verrerie à Denain (Nord).

Tout d'abord nous parlerons du moule qu'a imaginé M. Houtart (planche IV, *fig.* 1 à 8).

La figure 1 représente le moule vu du côté des pédales.

La figure 2 représente le moule ouvert, vu de côté.

La figure 3 représente le moule fermé avec la bouteille piquée.

La figure 4 représente le moule vu du côté opposé aux pédales.

La figure 5 représente le fond total.

La figure 6 représente la coupe verticale du fond et de la piqûre.

La figure 7 représente la partie métallique du fond.

La figure 8 représente l'étrier inférieur sur lequel doit reposer la molette, piqûre ou mandrin.

Le moule se compose: n° 1, d'une partie inférieure, cylindrique à l'extérieur et légèrement conique à l'intérieur, afin de pouvoir facilement en retirer la bouteille dont cette partie est destinée à modeler le corps;

N° 2, d'une partie supérieure destinée à donner la forme aux épaules et au col (dôme et goulot) de la bouteille et s'ouvrant en deux sections sur des charnières horizontales C.

Dans le bas de la pièce n° 1 se trouve ménagé un logement creux, cylindrique, plus large que le diamètre conique du surplus de cette partie. C'est dans ce logement qu'est placé le fond.

Ce dernier se compose de deux parties:

L'une A, en fonte de fer, en cuivre ou en bronze, dont le centre est traversé par la molette destinée à faire la fonceuse;

L'autre B, en terre réfractaire, sépare cette première partie du corps du moule formant matrice du dôme et du col. Elle est de la largeur du galbe de la bouteille.

Par leur conjonction, ces deux parties constituent le fond, mais sans adhérer l'une à l'autre; grâce au léger intervalle qui les sépare, le fer peut se dilater sans resserrer la terre.

La partie métallique A affecte la forme d'un chapeau à haute forme à bords plats, mais sans fond, quand le mandrin est retiré.

A l'intérieur c'est un disque métallique au milieu duquel s'élève un cylindre qui de haut en bas est creux et où peut s'élever et descendre la molette.

A l'intérieur, sa partie haute est formée par un rebord

annulaire en cuvette, que coupent d'intervalle en intervalle des canaux rectangulaires ou triangulaires correspondant à des dentelures ou cannelures qui, à la partie centrale inférieure de ce disque, laissent venir l'air, même quand la molette au repos, engagée dans le cylindre, en obture la partie supérieure sans surgir encore.

La partie B a, pendant le soufflage et le tournage, outre sa fonction de matrice, celle de maintenir le verre destiné à former le jable de la bouteille à une température plus élevée que celui qui touche les parois du moule et la partie A du fond.

Le verre qui pose sur la partie A étant, de son côté, plus malléable que celui qui s'applique sur les parois formatrices du col et du dôme, il en résulte que trois températures existent dans la matière totale de la paraison jusqu'à ce que la bouteille soit achevée.

La coexistence de ces trois états de température est une condition essentielle.

Supposons, en effet, la bouteille soufflée:

Les parties latérales supérieures seront glacées en tournant contre les parois intenses du moule; B étant en terre mauvaise conductrice de la chaleur, la partie du verre en contact avec B se trouvera encore très malléable quand le col et le dôme seront déjà refroidis et solidifiés.

La partie en contact avec A sera aussi restée malléable, parce que le mouvement de rotation donné à la paraison par l'ouvrier souffleur et mouleur aura mis alternativement le verre sur une partie pleine et une partie vide.

Toutefois la malléabilité sera moindre en A qu'en B, B ne mettant pas du tout le verre en contact avec le métal bon conducteur de la chaleur.

Par le mouvement de rotation qu'il imprime à la bouteille dans le moule, l'ouvrier obtient une surface glacée et bien plus régulière que celle qui est obtenue dans les moules à partie périphérique tournante. Il évite en même temps que les rugosités de la terre cuite du fond B viennent s'imprimer sur le jable, ce qui arrive forcément dans les divers moules constitués par la combinaison d'une périphérie tournante et d'un fond immobile en terre sur lequel la paraison reste constamment fixe.

Dans le dispositif de M. Houtart, la molette ou piqûre, au lieu d'être creuse comme dans les autres systèmes, est constituée par un cylindre plein. Elle est disposée de façon à pouvoir être facilement enlevée du moule lorsqu'elle est encrassée et empêchée de fonctionner par la fumée résultant de la combustion des copeaux ou de la sciure de bois qu'on met dans le moule pour faciliter le travail. En quelques secondes, l'ouvrier peut la nettoyer et la remettre dans le moule alors que, dans les systèmes anciens, il était nécessaire de démonter les contrepoids et même le moule en entier.

Un levier inférieur L, qu'une tige n° 3 fait relever lorsque l'ouvrier appuie le talon sur la pédale n° 2, a pour fonction de peser de bas en haut sur la molette et de la faire surgir dans le moule à la hauteur voulue pour former le fond de la bouteille.

L'ouvrier pour fermer le moule appuie la pointe du pied sur la pédale A, et, lorsqu'il s'agit de piquer, il appuie le talon sur la seconde pédale B, qui fait mouvoir la tige intermédiaire n° 3, laquelle correspond au levier chargé de faire remonter la molette à la hauteur voulue.

Ainsi, avec le même pied, il fait mouvoir les deux

pédales et la tige intermédiaire qui détermine la fonçure.

Lorsque la molette est entraînée à la hauteur voulue dans le cul de la bouteille, la pédale n° 2 est réglée dans sa course descendante par un marteau D qui vient s'appuyer sur le contrepoids H.

Lorsque l'ouvrier a terminé la piqûre, il abandonne les deux pédales, et le contrepoids H, qui est en H', reprend sa position primitive en H, et fait remonter la pédale n° 1, qui est reliée à lui par la charnière K, et la pédale n° 2, laquelle se trouve suspendue par le marteau D.

Avec ce système mis en action, la partie du verre qui est en A remonte d'abord et forme le haut de la piqûre. La partie du verre qui est en B remonte à la suite et forme le jable avec une très grande régularité qu'il serait impossible d'obtenir, autrement qu'avec un succès intermittent, au moyen de la fixité du fond de la bouteille sur un fond tout en terre.

Un des avantages que présente le moule du système Houtart sur ceux à fond fixe recevant une paraison fixe (comme le moule Lilbey et ses dérivés), c'est que, dans les moules à fond fixe et à périphérie tournante, la moindre fente qui se produit au fond oblige à son remplacement si l'on ne veut pas que le fond de la bouteille ait des stries épousant la forme de cette fente ; tandis que, dans le moule dont nous parlons, la rotation de la paraison empêche toute empreinte de se produire, que la partie B soit fendue ou non.

Ce moule présente encore l'avantage d'être indépendant de la place de l'ouvrier.

Une longue expérience a démontré qu'avec ce système on obtient des bouteilles parfaitement lisses depuis le col jusque dans le fond de la piqûre et un jable toujours

bien horizontal, ce qui permet à la bouteille de se tenir toujours bien perpendiculaire à la surface plane sur laquelle elle est posée.

Transporteur mécanique destiné à renvoyer au four à recuire les bouteilles ou tous autres objets en verre. — M. Houtart a imaginé tout récemment un appareil excessivement ingénieux, destiné au transport des bouteilles dans le four à recuire. Il est arrivé à supprimer tous les porteurs et réalise ainsi une économie considérable sur la main-d'œuvre.

Cet appareil, breveté en France et à l'Étranger, est représenté planche V, figures 1, 2 et 3.

Il se compose de deux bâtis AA′ montés sur coulisses, reliés par des fers à T : B, B. Sur ces fers à T sont montés des godets G destinés à guider la courroie C placée sur champ, à laquelle sont fixées des tiges supportant des godets-porteurs D (*fig.* 1 et 3). Des récepteurs O montés sur des fers à T sont placés devant l'ouvrier. Un engrenage F prend son mouvement soit à droite, soit à gauche, par une poulie H.

La courroie C glisse sur des galets G aussitôt le mouvement donné, et entraîne avec elle les godets-porteurs D. Le fond de ces godets est monté à bascule et occupe à vide une position horizontale. Sur l'axe de rotation du fond et à l'extérieur du godet est fixé un taquet qui se trouve placé normalement par rapport au fond du godet.

Les récepteurs O placés à demeure devant la place de l'ouvrier ont pour but de lui permettre d'y jeter sa bouteille fabriquée ou l'objet à recuire, sans que ce mouvement lui fasse perdre plus de temps que s'il remettait son sabot au gamin-porteur. Une trappe maintenue fer-

mée par un contrepoids se trouve de l'un des côtés du récepteur.

Le premier godet vide passant sous le récepteur vient au moyen du taquet ouvrir la trappe du récepteur, et la bouteille qui s'y trouve glisse dans le godet. Par suite du fond articulé, celui-ci s'incline aussitôt la bouteille reçue, le taquet s'écarte de sa position verticale et le godet passe librement sous d'autres récepteurs sans les actionner. Le godet par cette disposition ne prend et ne peut prendre qu'une seule bouteille. La trappe du récepteur en vertu du contrepoids se referme aussitôt la bouteille reçue dans le godet, et ce dernier poursuit sans arrêt sa route pour aller déverser la bouteille en S sur un plan incliné qui la conduit au fourneau. Le godet, qui est articulé de façon à pouvoir s'incliner de l'avant à l'arrière, est maintenu horizontalement par les glissières E qui servent en même temps de guides afin d'éviter le mouvement de bascule. Arrivé au bâti A', le godet quitte la glissière et se trouve conduit par une barre de fer disposée en culbuteur. Cette barre de fer est courbée de façon à relever le godet de l'arrière à l'avant; l'objet à recuire se trouvant dans le godet est déversé sur le plan incliné S et de là se rend dans le fourneau à recuire. Le godet entraîné par la courroie quitte le culbuteur et reprend sa position normale, prêt à recevoir un nouvel objet.

Les godets-porteurs, rapprochés aussi près que l'on voudra, permettront d'enlever rapidement les objets fabriqués pour les porter au fourneau à recuire. Il n'y a donc pas lieu de craindre le refroidissement de l'objet à transporter, puisque celui-ci arrive au fourneau plus vite que lorsqu'il est porté par le gamin porteur même.

L'appareil destiné à remplacer cet ouvrier remplit par

conséquent bien son but, puisque la bouteille, dès qu'elle a quitté les mains de l'ouvrier, se trouve emportée au fourneau, sans exiger aucune manœuvre intermédiaire.

Un autre point remarquable et qui fait la valeur de l'appareil, c'est qu'il peut être appliqué à n'importe quel four, quelles que soient sa disposition et la distance qui le sépare du fourneau.

Appareil Houtart permettant le classement des bouteilles suivant leur capacité. — Depuis longtemps, pour opérer le mesurage des bouteilles et pouvoir les classer d'après leur contenance, en catégories diverses, on a eu l'idée toute naturelle de les emplir d'eau, que l'on déversait ensuite dans des vases gradués.

Cette opération s'est d'abord effectuée à la main et bouteille à bouteille, ce qui exigeait un temps considérable.

Elle a été plus tard essayée au moyen d'un appareil composé de deux arbres tournants parallèles, entre les deux extrémités desquels étaient placées les bouteilles; celles-ci, remplies d'eau à la partie inférieure, étaient ensuite renversées dans un vase quelconque, en imprimant un demi-tour à la machine. Mais toujours, quelque rapide que fût le mouvement, une notable portion du liquide s'écoulait pendant sa durée, ce qui causait des erreurs. En outre, l'opération était relativement longue, puisqu'on devait successivement, à la partie supérieure de la machine, faire dégorger les bouteilles, les enlever et les remplacer par d'autres.

L'appareil que nous allons décrire planche VI permet de faire ce mesurage d'une façon très rapide et économique. Son organe essentiel est composé de deux croix parallèles rattachées chacune à l'extrémité d'un axe rotatif, posé

sur deux supports à coussinets, dans lesquels l'ensemble tourne dès qu'il est actionné à la main.

Pour chacune de ces croix, quatre rayons ou bras égaux forment deux à deux un diamètre.

Les deux diamètres sont perpendiculaires l'un à l'autre, chaque bras porte à son extrémité une rondelle soutenant deux barres rattachées à la rondelle parallèle; de façon que, dans le sens de la génératrice du cylindre idéal que forme en tournant la double croix, on puisse disposer un grand nombre de bouteilles, une douzaine par exemple.

Nous désignerons sous le nom de portant l'ensemble de deux rondelles et deux barres, destiné à maintenir les bouteilles sans les briser.

Ces portants sont donc au nombre de quatre.

Cela expliqué au vu du dessin, supposons qu'un ouvrier ait déjà chargé de bouteilles l'un de ces portants; on fera alors décrire un quart de tour au moulinet et on chargera le second portant qui sera venu se placer en face de l'ouvrier.

Pendant ce temps, l'organe n° 1 plongera dans un bac rempli d'eau, où doivent s'emplir les bouteilles qu'il soutient; lorsque l'organe n° 2 se trouvera chargé de bouteilles, on fera faire au moulinet un second quart de tour; l'organe n° 3 se placera en face de l'ouvrier; l'organe n° 2 plongera dans le bac et l'organe n° 1 s'élèvera en face d'un second ouvrier qui fera dégorger les bouteilles en les renversant dans une série de mesures graduées.

Après cela, cet ouvrier enlèvera les bouteilles pour les classer en diverses catégories, selon leur contenance, puis videra les mesures en faisant écouler dans le bac l'eau qu'y auront abandonnée les bouteilles. On fera

enfin faire un nouveau quart de tour au moulinet, et indéfiniment l'opération pourra se continuer de la même manière.

La figure 1 représente, en coupe verticale, le moulinet vu de côté.

Aux points KKKK sont les quatre bras.

Sur l'axe de soutènement formant marteau que chacun de ces bras porte à son extrémité vient s'adapter la plaque en tôle ou rondelle (*fig.* 3) qui, par son milieu, est percée du trou rond M, afin de pouvoir tourner avec facilité autour de cet axe.

C'est entre deux de ces rondelles de tôle placées parallèlement sur chacun des rayons ou bras, que s'insèrent les deux barres P, S, destinées à maintenir les bouteilles l'une par le bas, l'autre par le haut.

Des entretoises y forment un cadre pour maintenir l'écartement des bras et fortifier l'ensemble.

Le bac contenant l'eau pour emplir les bouteilles est figuré en AB, AB.

En N, on voit une barre de fer fixée par sa partie inférieure au bac AB. Elle forme à sa partie supérieure un coude sur lequel l'un des bras du moulinet vient se reposer pendant que le second ouvrier est occupé à culbuter les bouteilles pleines dans les entonnoirs I, au-dessous desquels sont placées les mesures dont la graduation sert à indiquer la contenance de chaque bouteille.

En O, une autre barre formant talon est destinée à empêcher le moulinet de fonctionner pendant qu'en L le premier ouvrier place les bouteilles sur le portant pour ensuite, quand le chargement sera complet, les diriger par un quart de tour vers le bac d'emplissage.

Ces deux barres N et D, formant ressort, se placent automatiquement dès que l'un des bras devient horizontal.

Quand il s'agit de faire marcher le chargement vers le réservoir, le premier ouvrier écarte la barre O au moyen d'une poignée.

La figure 4 donne le détail des barres P et S qui (ainsi qu'il a été dit ci-dessus) relient les deux rondelles parallèles.

Suivant que les bouteilles à mesurer sont plus ou moins hautes, chacune de ces barres peut être remontée ou abaissée au moyen d'écrous fixés dans une coulisse.

La barre P est munie de troncs de cône, ou parties mâles RR (en rouge sur la figure), et destinés à entrer dans le fond creux, ou partie femelle inférieure des bouteilles, pour les empêcher de glisser. Ces troncs de cône pourront être construits en bois, en caoutchouc vulcanisé, en tôle, ou en toute autre matière de nature à ne pas briser le verre.

Machine à laver les bouteilles. — Il existe une machine à curer les bouteilles. Elle consiste en une auge A (*fig.* 60), où se trouve de l'eau avec une dissolution de carbonate de soude; dans cette auge se meut, autour d'un axe, une roue divisée en compartiments dans lesquels on peut placer les bouteilles.

Les bouteilles à rincer sont mises dans la roue, du côté droit; leur poids fait tourner la roue, ces bouteilles s'emplissent partiellement de la dissolution alcaline. La roue continuant son mouvement de rotation par suite de l'adjonction de nouvelles bouteilles, les premières bouteilles sortent de la dissolution et, au fur et à mesure, sont prises par l'opérateur, qui les passe sur la brosse tournante.

Cette brosse est mise en mouvement par l'ouvrier lui-même, au moyen d'une pédale et de deux poulies. La

brosse se trouve placée sur une auge B qui reçoit les eaux de lavage et les renvoie par un tuyau dans le bac A.

Pour rincer et égoutter les bouteilles, on les place verticalement sur des ajutages montés sur quatre bras horizontaux. Ces bras sont eux-mêmes montés dans une cuve tournant autour d'un axe vertical au moyen d'une couronne dentée et d'une vis sans fin.

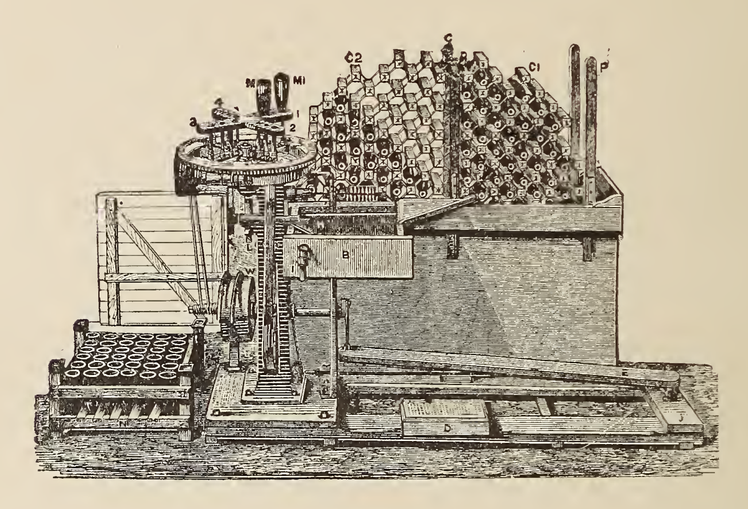


Fig. 60.

L'arbre vertical est creux et est divisé en deux par une cloison verticale ; d'un côté, il reçoit l'eau sous pression de la ville ou d'un réservoir, et de l'autre il reçoit l'eau d'égouttage des bouteilles. A la partie supérieure, cet arbre porte une disposition spéciale permettant tantôt à l'eau sous pression d'arriver dans un des bras, par conséquent dans les ajutages et dans les bouteilles, tantôt mettant bouteilles, ajutages et bras en relation avec le tuyau d'écoulement de l'eau.

Les bouteilles, après avoir passé sur la brosse, sont mises sur les ajutages. Elles accomplissent un tour com-

plet, pendant la première moitié duquel elles reçoivent l'eau sous pression servant à les rincer; pendant la dernière moitié du tour, l'eau de rinçage peut s'écouler et

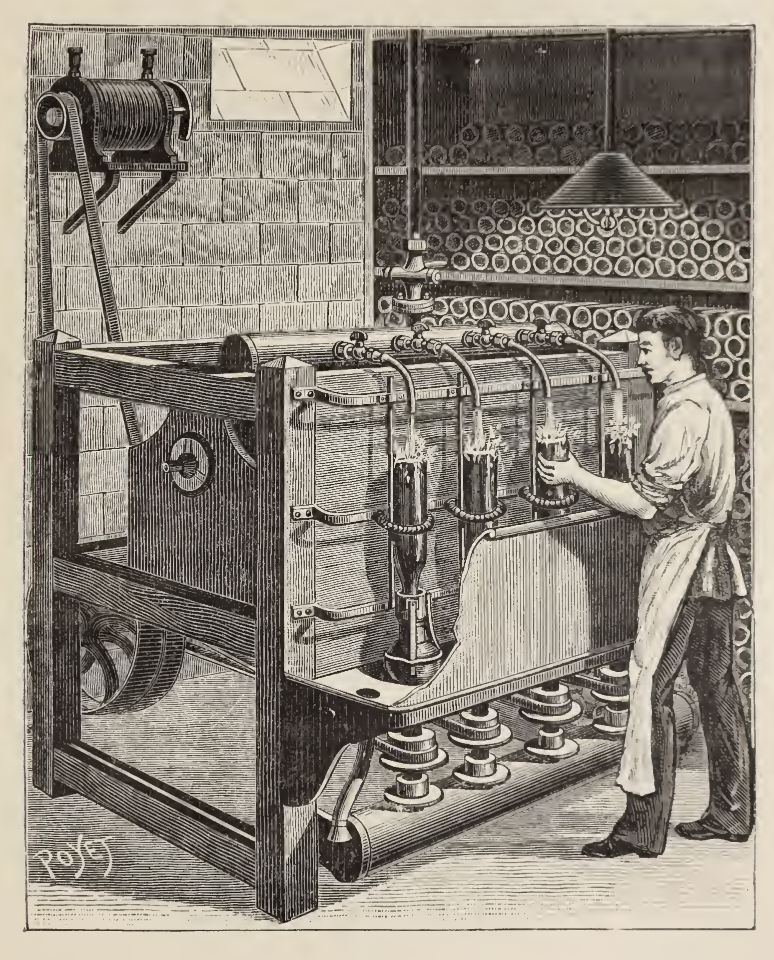


Fig. 61.

les bouteilles s'égouttent. Elles sont alors retirées.

Un homme, actionnant la machine et passant les bouteilles sur la brosse, aidé d'un gamin plaçant les bou-

teilles sales dans la roue et retirant les bouteilles propres des ajutages, peut laver et rincer de quarante à soixante douzaines de bouteilles par heure.

La machine occupe une surface de $2^m,50$ sur $1^m,30$.

La figure 61 donne l'ensemble de la machine à rincer les bouteilles de M. Rouffet, constructeur.

54. — Soufflage à l'air comprimé. — La fabrication d'objets soufflés de grande capacité, tels que bonbonnes, touries, etc., présentait jusqu'en ces derniers temps de grandes difficultés.

L'ouvrier avait recours à l'injection d'eau ou d'alcool, mais l'effet de ces liquides, ne pouvant être gradué à volonté, était ou bien insuffisant ou bien trop brutal.

Il en résultait une inégalité d'épaisseur qui compromettait la résistance de ces objets.

M. Appert a cherché à supprimer complètement le rôle de l'ouvrier souffleur, rôle si pénible et si préjudiciable à sa santé, en remplaçant le souffle humain par une injection d'air comprimé. Il a inventé un appareil pouvant se prêter au travail du soufflage pour des objets de toutes formes et de toutes dimensions : bouteilles, manchons de verre à vitres, etc. Suivant la nature de l'objet à souffler, l'appareil a reçu diverses modifications rendant possibles tous les mouvements que l'ouvrier doit donner à la canne. Rien ne le gêne dans son travail ; il peut soit faire tourner rapidement la canne sur elle-même, soit la tenir verticalement, le « nez » en haut ou en bas, soit lui donner le mouvement du pendule.

La canne est reliée à la soufflerie d'air comprimé à l'aide d'un appareil dit « manchon à souffler » (*fig.* 62). Ce manchon est composé d'un cône en caoutchouc *a* fixé à son extrémité supérieure à un anneau conique *b* qui

est lui-même adapté au revêtement *c* du manchon à souffler. La canne est reliée à la conduite d'air comprimé au moyen d'un tuyau en caoutchouc qui est maintenu serré par un anneau en cuivre à baïonnette.

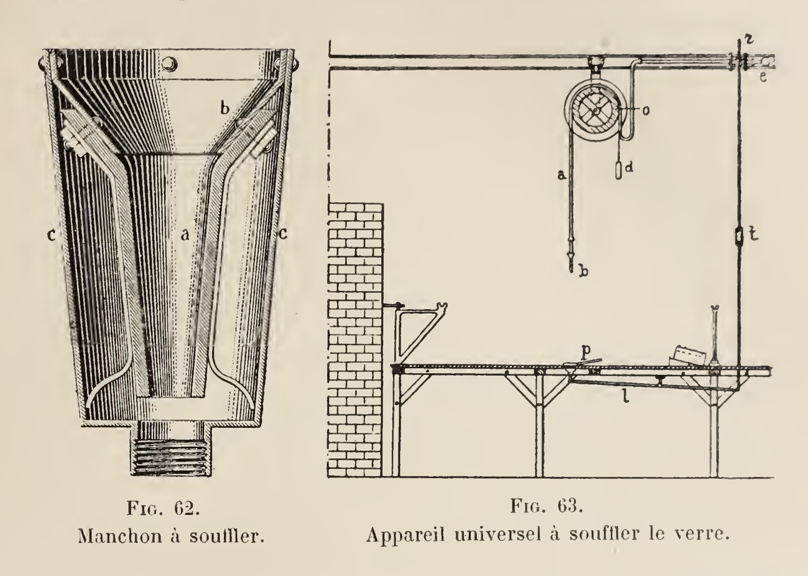


Fig. 62.
Manchon à souffler.

Fig. 63.
Appareil universel à souffler le verre.

En fixant la canne dans le cône en caoutchouc, elle en devient une partie intégrante et emporte avec elle, dans tous ses mouvements, le tuyau amenant l'air.

Cet appareil très simple et peu encombrant peut trouver sa place partout où le soufflage est pratiqué, aussi bien sur le « banc » du souffleur de menus objets que sur la place du verrier à vitres.

Nous donnons ici la description sommaire de l'appareil dit « appareil universel » à souffler le verre.

Il se compose de deux pédales P (*fig.* 63) qui font saillie au-dessus de la plate-forme de travail et mettent en mouvement par les tiges *lt* un robinet d'arrêt automatique *r*, situé à la partie supérieure de l'atelier.

En pressant sur l'une ou l'autre des deux pédales,

l'ouvrier ouvre le robinet I qui communique d'un côté avec le tuyau *e* amenant l'air comprimé, de l'autre avec un tuyau flexible *a* qui passe sur une poulie *o* et qui est relié avec une branche d'accouplement *b*. Un contrepoids *d* équilibre le poids du tuyau *a*, de telle sorte qu'il s'allonge ou se raccourcit de lui-même sans que l'ouvrier ait à s'en occuper.

Le soufflage à l'air comprimé, qui seul a pu permettre la fabrication d'objets de dimensions colossales, tels que la sphère de $1^{m},55$ de diamètre dans laquelle on a pu découper trois mille verres de montre, avait été étudié par M. Appert dans le but de rendre moins pénibles les conditions de travail du souffleur. Ce but a été atteint et les nombreuses applications qui sont faites démontrent nettement que partout cette innovation a été considérée comme un véritable bienfait.

§ 3. — Gobeleterie

Verre à pivette. — On donne ce nom au verre qui est employé à la fabrication des fioles de pharmacie, des vases de laboratoires, etc. Ce verre est obtenu avec des sables ferrugineux qui lui donnent la teinte verdâtre qui le caractérise. Quoique présentant une grande analogie de composition avec le verre à bouteilles, il est cependant un peu moins fusible que ce dernier.

55. — Verre demi-blanc, verre blanc. — Pour les objets tels que les carafes, les burettes, qui demandent d'être peu colorés, on fait usage de matières premières choisies. En outre, on remplace fréquemment la soude ou partie de la soude par la potasse employée sous forme de

carbonate. Fréquemment aussi, on blanchit ce verre par addition de bioxyde de manganèse ou d'oxyde de cobalt.

Dans le cas de verre au sulfate, ces colorants ne sont généralement pas ajoutés à la composition vitrifiable elle-même, car ils seraient en partie réduits par le charbon et perdraient ainsi plus ou moins de leur propriété décolorante. On les emploie généralement de la façon suivante : on prépare un verre de première fusion qu'on tire à l'eau pour l'étonner et qu'on refond ensuite avec addition des oxydes décolorants. On obtient ainsi, suivant les soins apportés au choix des matières premières, des verres qu'on désigne dans le commerce sous les noms de verre demi-blanc, — verre blanc.

56. — Compositions. — Voici quelques compositions de ces verres :

Verres français et belges

Sable	300	48	36
Carbonate de soude pur	72	12	12
Carbonate de potasse	25	4	»
Chaux	80	»	»
Calcaire	200	12	10
Nitrate de soude	5	»	»
Bioxyde de manganèse	1,50	»	»
Oxyde de cobalt	0,017	»	»
Calcin (débris de verre)	»	24	42

Nous croyons intéressant de donner l'analyse d'un verre qui nous a frappé par sa blancheur remarquable :

Silice	70,40
Potasse	8,66
Soude	9,13
Chaux	10,00
Alumine	0,99
Peroxyde de fer	0,02
Peroxyde de manganèse	0,50
	99,70

On fabrique, dans ce genre, en Amérique, des verres qui ne laissent rien à désirer comme blancheur. En outre, on fait usage pour la fabrication d'objets de ménage, lampes, salières, soucoupes, etc., d'un verre blanc opaque imitant la porcelaine. Ce verre, qui jouit de propriétés particulières, ne pourrait pas être soufflé ; il n'est travaillé que par moulage.

Voici la composition du verre transparent et celle du verre opaque de fabrication américaine :

	Verre transparent	Verre opaque
Sable	63,02	67,20
Carbonate de soude	23,11	»
Nitrate de soude	5,05	»
Chaux	8,40	»
Arsenic	0,33	0,36
Oxyde de manganèse	0,09	0,18
Soufre	traces	»
Cryolithe	»	26,88
Oxyde de zinc	»	5,38
	100,00	100,00

Demi-cristal. — Un verre employé fréquemment en gobeleterie fine est le demi-cristal. Sa composition est celle du verre blanc, en ayant soin d'employer des produits très purs.

Quelquefois on y fait entrer une certaine quantité d'oxyde de plomb qu'on y introduit à l'état de minium. Les objets fabriqués en demi-cristal sont, après soufflage ou moulage, taillés à la façon du cristal.

57. — Fabrication. — Quelle que soit la qualité du verre employé en gobeleterie, les modes de fabrication sont identiques. Ils consistent à opérer le soufflage de la

pièce dans un moule qui porte intérieurement les dessins que devra présenter à l'extérieur l'objet fabriqué.

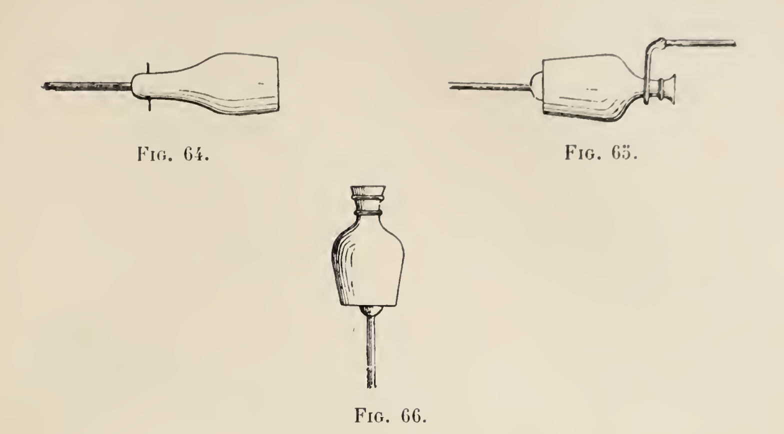


Fig. 64. Fig. 65.

Fig. 66.

Dans la planche III on trouvera la description d'un four. Les figures 64, 65, 66 reproduisent les diverses phases de la fabrication d'une carafe.

On obtient certaines pièces par moulage seul.

On emploie à cet effet un poinçon ou mandrin à levier qui, pénétrant dans la masse du verre chaud, oblige ce dernier à prendre la forme du moule qui l'environne (*fig.* 67).

Cette manière d'opérer a l'inconvénient de limiter la forme des objets moulés. En effet, la nécessité d'enlever le mandrin après moulage oblige à ne fabriquer que des pièces cylindriques ou coniques à l'intérieur.

Tubes en verre. — Les tubes sont fabriqués le plus généralement avec un verre très dur, fort chargé de silice et de chaux. Ils ont, en effet, le plus souvent, pour destination, l'emploi à des travaux de laboratoire pour lesquels la résistance au feu et aux agents chimiques est une qualité indispensable.

Les tubes en verre s'obtiennent de la façon suivante : après avoir cueilli à l'extrémité de sa canne la quantité de verre nécessaire, l'ouvrier la souffle et lui donne la forme d'une poire à parois très épaisses. A ce moment, un autre ouvrier vient souder à l'autre extrémité de la poire une boule de verre qu'il a cueillie à l'aide d'une tige en fer. Puis, les deux ouvriers s'éloignent l'un de l'autre, tout en donnant un mouvement de rotation rapide à leurs outils jusqu'à ce que le tube ait atteint le diamètre voulu.

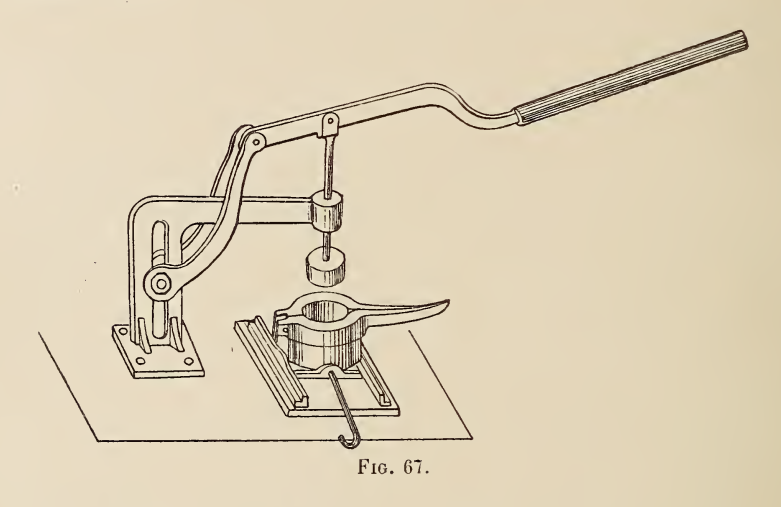


Fig. 67.

Le tube encore flexible se courbe sous son poids à mesure qu'il se forme ; aussi le redresse-t-on en le disposant sur des planchettes. On le coupe ensuite, par l'application d'un fer froid, en morceaux de longueur voulue qu'on porte au four à recuire.

Pour certaines applications, comme celles des thermomètres, on exige assez souvent — afin de rendre plus visible la colonne de mercure — que le trou soit méplat au lieu d'être cylindrique.

Voici comment on opère pour cette fabrication : après

avoir soufflé la paraison, on l'aplatit sur le marbre, on la laisse un peu refroidir, puis on la recouvre d'un nouveau cueillage qu'on arrondit. Le verre intérieur étant relativement froid, le trou conserve la forme aplatie qui lui a été donnée au début.

On fait ensuite la tirée du tube dont la section intérieure ne se modifie pas.

§ 4. — Verres à vitres. — Verres en cylindres

58. — Historique. — Nous avons dit, en parlant de l'origine du verre, que les vitres étaient connues des Romains et que les doutes qu'on pouvait avoir à ce sujet avaient été levés d'une manière irrécusable par la découverte dans les ruines de Pompéi de vitres encore adhérentes à leur monture.

L'usage ne s'en répandit en Gaule que vers le IIIe siècle et encore n'employait-on les vitres que pour garnir les fenêtres des églises. La généralisation en fut excessivement lente. Jusqu'au siècle de Louis XIV, on ne faisait usage pour les habitations que de carreaux de petites dimensions, encastrés dans des baguettes de plomb. C'est seulement à cette époque que l'on se servit de vitres en un seul morceau, et encore faut-il ajouter que les habitations luxueuses en étaient seules pourvues. On sait en effet qu'au XVIIIe siècle il existait encore une corporation dite des « chassessiers », dont la profession consistait à garnir les fenêtres de papier huilé.

Les premières verreries à vitres ont été installées en France au XIe siècle; elles travaillaient suivant le procédé des plateaux.

Au commencement du XVIIIe siècle, la fabrication du

verre à vitres était très florissante en Normandie, et elle s'exécutait encore par le procédé des plateaux. L'importance de cette fabrication était très considérable, à en juger par le passage suivant que nous extrayons de l'*Histoire de la Verrerie* par E. Garnier :

« Le verre fabriqué en Normandie était emballé dans des sortes de cages ou « paniers » en bois blanc, plus larges par le haut que par le bas, garnis de paille dans le fond et sur les côtés et contenant chacun vingt-quatre « plats » ou feuilles de verre, séparés par des réglettes de bois blanc garnies de paille.

« Ces paniers étaient expédiés à Paris, rue Saint-Denis, au Renard-Rouge, où se trouvait le bureau des maîtres faïenciers, verriers, etc., et où se faisaient le déchargement, la vérification et la vente des verres qui arrivaient chaque jour.

« Mais les verreries normandes n'envoyaient pas tous leurs produits à Paris ; la plus grande partie était expédiée en Angleterre, ou prenait le chemin du Havre ou de Bordeaux pour passer de là en Hollande, en Espagne et en Portugal ; il en résulta, à un moment donné, non seulement un renchérissement considérable, mais encore une si grande rareté du verre à vitres que le Gouvernement dut intervenir pour régler d'une façon précise les conditions dans lesquelles devait se faire l'approvisionnement de Paris et empêcher sous les peines les plus sévères l'exportation du verre à l'Étranger. »

C'est ainsi que l'article premier de l'arrêt du 4 mars 1724 est conçu :

« Article premier. — Les maîtres et entrepreneurs des quatre verreries de Lyons en Normandie sont tenus de fournir et de faire voiturer, dans le bureau ordinaire des maîtres verriers de Paris, chacun une charretée de

verre à vitres par semaine, à compter du jour du présent arrêt jusqu'au 1er avril prochain, et chacun deux charretées aussi par semaine depuis ledit jour 1er avril jusqu'au dernier septembre suivant, et enfin une charretée aussi chacun par semaine depuis ledit jour dernier septembre jusqu'au 1er avril de l'année prochaine 1725.

« A peine de 500 livres d'amende pour chacune contravention et pour en faciliter le recouvrement en cas d'inexécution du présent arrêt, il sera par lesdits maîtres des verreries, dans quinzaine, nommé une personne solvable dans ladite ville de Paris, pour caution et qui sera reçue par devant le sieur lieutenant-général de police de Paris, les jurez de ladite communauté des maîtres verriers présents ou duement appelez, comme aussi sera tenu chacun desdits maîtres de verreries d'apposer sur les paniers de verres de sa fabrique une marque distincte et particulière, laquelle sera aussi inscrite sur chaque lettre de voiture. »

Les articles III, IV et V déterminent la dimension des feuilles de verre; la contenance des paniers et le nombre des paniers composant une charretée.

L'article VI fixant le prix est ainsi conçu :

« Art. VI. — Et Sa Majesté ayant égard au prix excessif où le bois a été porté, elle ordonne que le verre ainsi conditionné sera payé auxdits maîtres de verreries par lesdits maîtres vitriers sur le pied de 30 livres le panier de fin et de 27 livres le panier du second. »

« Cet arrêté, qui nous donne des renseignements précieux sur la façon dont se faisait le commerce du verre à vitres à cette époque, modifiait simplement les conditions d'existence des quatre grosses verreries qui s'y trouvaient particulièrement visées. Plutôt que de se soumettre à l'obligation de ne vendre que 27 livres ce

qu'ils avaient vendu dans les dernières années 50 et même 60 livres, les propriétaires de trois de ces verreries préférèrent laisser éteindre leurs fours. La seule verrerie de Landel resta en activité ; et, comme la quantité de paniers qu'elle pouvait envoyer à Paris était loin de satisfaire aux exigences de la consommation, le Gouvernement prit, à la date du 12 décembre 1724, un nouvel arrêté par lequel il obligeait les autres verriers en Normandie, notamment ceux du comté d'Eu, à entrer pour leur part dans l'approvisionnement de Paris, tout en maintenant, malgré les réclamations faites par les maîtres de verreries, les prix fixés par l'arrêté du 4 mars. — Il semble cependant qu'à la fin les verreries aient obtenu gain de cause. Il était difficile, du reste, qu'il en fût autrement. D'une part, on ne pouvait obliger les maîtres de verreries à fournir mensuellement une quantité de paniers déterminée à l'avance, parce qu'il leur était toujours possible d'invoquer, pour se soustraire à cette obligation, des raisons tirées de difficultés pratiques : usure des fours, manque de matières premières ou de combustible ; d'autre part, il était plus difficile encore de les contraindre à résister aux offres avantageuses qui leur étaient faites par des commerçants étrangers. Le Gouvernement dut donc se borner à propager d'année en année la défense qu'il avait faite d'exporter du verre à vitre hors du royaume et à maintenir la suppression des droits d'entrée sur le verre en cylindre. »

Un peu après cette époque, la fabrication de ce dernier s'introduisit en France. M. Drolinveau établit à Saint-Quirin (Vosges) la première verrerie travaillant d'après un procédé qui était celui utilisé en Bohême. Puis, vinrent les verreries du Nord de la France, Anzin, Fresnes, qui furent fondées par un verrier belge.

59. — Composition du verre à vitres. — On distingue deux sortes de verre à vitres : le verre blanc et le demi-blanc. Ce dernier est obtenu avec les résidus de la fabrication du verre blanc et même avec le pycadil ou verre très impur, provenant de la matière qui déborde des creusets pendant l'affinage et qu'on recueille sur la sole des fours.

Les applications du verre demi-blanc sont devenues maintenant très rares.

La fabrication du verre blanc est de beaucoup plus importante ; cependant, depuis quelques années, elle décroît dans de notables proportions, par suite de la généralisation de l'emploi des glaces pour les vitrages d'appartements, et par la concurrence que fait au verre à vitres le verre mince coulé qu'on emploie avec avantage pour la couverture des serres, marquises, vérandas, etc.

Le verre à vitres est un silicate double de soude (ou de potasse) et de chaux, contenant en outre, accidentellement, des doses très faibles d'autres bases amenées par les matières premières qui ne sont jamais complètement pures.

La composition du verre à vitres est beaucoup moins variable que celle du verre à bouteilles ; les formules anciennes ou nouvelles sont beaucoup moins nombreuses.

A la fin du siècle dernier, les compositions étaient formées de :

Soude d'Alicante ou de Sicile	280 livres
Sable...........................	300 —
Cendres	200 —
Salin (ou potasse)...............	60 —
Saffre	1 once 6 gros

ou bien encore :

Salicor du Languedoc...	340 livres
Sable..................	440 —
Cendres	200 —
Salin ou potasse	60 —
Saffre	1 once 6 gros

Après la découverte du procédé Leblanc, on introduisit dans les compositions la soude à l'état de carbonate.

Le mélange employé dans les verreries de la Loire et du Nord fut pendant longtemps le suivant :

Sable....................	100
Sel de soude	40
Chaux....................	20
Arsenic..................	0,5
Oxyde de manganèse......	0,5

Le verre anglais était obtenu avec le mélange :

Sable de Fontainebleau....	100
Sel de soude	36
Nitrate de soude	5
Chaux éteinte	12
Arsenic..................	0,5

A la suite des travaux de Pelouze, on remplaça en verrerie le sel de soude par le sulfate. Tout d'abord cette substitution ne fut que partielle ; mais, en présence des résultats satisfaisants qu'on obtint, on en arriva très rapidement à ne plus employer que le sulfate. Vers la même époque, on remplaça également la chaux vive ou éteinte par le carbonate de chaux ou calcaire.

Nous donnons ci-dessous les compositions employées actuellement, ainsi que l'analyse de différents verres à vitres, français et étrangers.

	Verreries du Nord	Verrerie de Bagneaux
Sable	100	100
Sulfate de soude	35 à 40	42
Calcaire	25 à 35	34
Charbon en poudre	1,5 à 2	2
Peroxyde de manganèse	0,5	»
Arsenic	0,5 à 1	»
Débris de verre	quantité variable	100 à 200

	Verre allemand	Verre belge	Verres anglais		Verres français		Verre blanc à base de potasse
Silice	72,25	73,31	70,71	72,90	71,90	69,60	71,20
Chaux	13,40	13,24	13,38	13,20	13,60	13,40	11,60
Alumine, fer et manganèse	1,23	0,83	1,92	1,50	1,40	1,80	0,70
Soude	13,02	13,00	13,25	12,40	13,10	15,20	2,30
Potasse	»	»	»	»	»	»	14,20

Nous nous étendrons plus longuement, en traitant du verre à glaces, sur le mode de préparation des mélanges vitrifiables. Nous nous contenterons ici de rappeler que les verriers se gardent bien de modifier leur composition. Ils ont déjà, en effet, assez à compter avec les variations d'allure de leurs fours sans ajouter à ces inégalités de marche celles qui résulteraient, pour la fusibilité du verre, d'une modification dans la teneur relative des matières premières.

Les seuls changements qu'apporte le verrier portent sur la dose de charbon. Il est en effet nécessaire d'en faire varier la teneur avec l'allure plus ou moins réductrice du four, allure qui change avec l'âge de ce dernier. On constate d'une façon générale que, quand un four vieillit, il y a

nécessité d'augmenter la teneur en charbon, ce qui résulte de ce fait que les flammes sont moins réductrices.

60. — Fabrication du verre à vitres. — Le verre à vitres est fabriqué d'après deux procédés: le premier dit « des cylindres », appliqué en France et en Belgique ; le second dit des « plateaux », usité en Angleterre.

Procédé des cylindres. — Dans ce procédé, appelé encore procédé des « manchons », on souffle un cylindre qui est ensuite fendu suivant une génératrice, puis étendu après réchauffage.

Cette méthode est celle qui était usitée à Venise et en Allemagne, au XIIe et au XIIIe siècle, pour la fabrication des vitraux; elle n'a subi que peu de modifications depuis cette époque.

Nous ne parlerons pas des fours dont il a été question plus haut, nous nous contenterons d'en représenter quelques-uns (planches I, II, III et VII). Devant chaque ouvreau est disposée une fosse ou galerie, étroite, très profonde, au-dessus de laquelle se trouvent placés les ouvriers.

Le verre étant amené par le refroidissement au point convenable, le travail commence. Il est exécuté par deux ouvriers: un souffleur et un aide désigné dans toutes les verreries sous le nom de gamin.

Les outils nécessaires sont : la canne, d'une longueur de 1m,60 à 2 mètres, une palette en fer de 0m,15 de long sur 0m,06 de largeur, servant à parer le verre du premier cueillage, des ciseaux employés pour couper le verre quand il est encore plastique, quelques blocs en bois de pommier ou de hêtre, percés de cavités demi-sphériques

de diamètres différents servant à souffler la boule du manchon.

A l'aide de la canne, chauffée au préalable au rouge sombre, le gamin cueille dans le creuset une petite masse de verre (environ 200 grammes) qu'il arrondit ; il en cueille ensuite une masse un peu plus considérable (500 grammes) qu'il laisse refroidir, tout en soufflant légèrement, afin d'avoir une ouverture par où passera l'air. Un troisième cueillage est fait dans les mêmes conditions, et à ce moment la canne est prise par le souffleur qui procède à un quatrième et dernier cueillage.

Ayant ainsi, à l'extrémité de la canne, la quantité de matière en rapport avec les dimensions de la feuille de verre à obtenir, le souffleur la pare à l'aide de la palette décrite ci-dessus, puis la souffle en la faisant tourner, en la « mabrant » dans les cavités du bloc en bois.

Cette paraison est ensuite réchauffée à l'ouvreau, puis soufflée en élevant la canne verticalement.

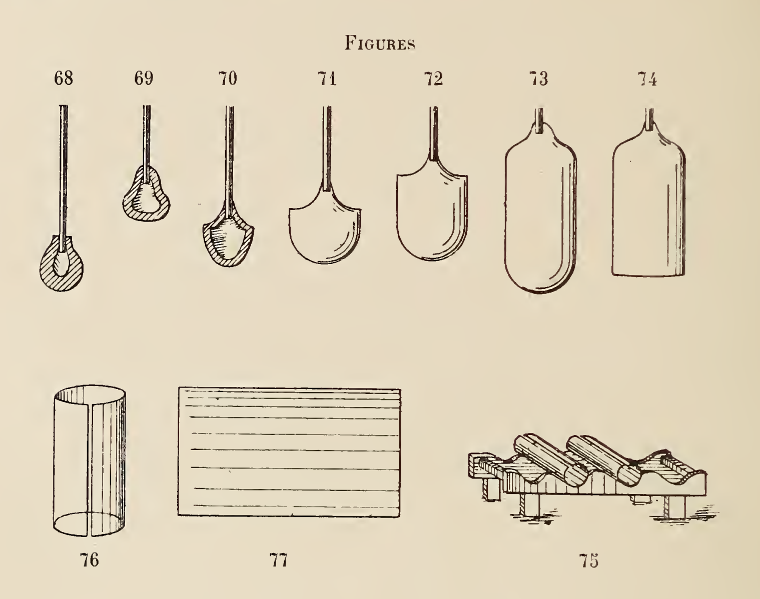
Après réchauffage, l'ouvrier souffle fortement à plusieurs reprises, tout en donnant à la canne un mouvement de va-et-vient semblable à celui d'un battant de cloche, de manière à allonger la masse. (Voir *fig.* 68 à 77, qui représentent les diverses phases du travail d'un manchon.)

Il réchauffe la portion hémisphérique, il donne à la canne et au manchon un mouvement complet et rapide de rotation, qui a pour effet d'étirer la pièce, tout en lui conservant une épaisseur égale dans toutes ses parties.

On ouvre alors la partie inférieure du cylindre. Pour cela, l'ouvrier en réchauffe l'extrémité fermée, puis la perce à l'aide d'une tige en fer.

Il donne ensuite à l'ensemble un mouvement de va-et-vient qui agrandit cette ouverture, laquelle est ensuite

régularisée à l'aide de la palette et en faisant tourner rapidement la pièce sur elle-même : la calotte qui terminait le cylindre se trouve ainsi effacée.



Après refroidissement, le cylindre est placé sur un chevalet en bois ; on détache la canne en touchant la naissance du cylindre avec une tige de fer froide ; on enlève ensuite la calotte en enroulant un filet de verre très chaud, puis touchant la partie chauffée avec un fer froid.

On a donc ainsi, sur le chevalet, un manchon ouvert à ses deux extrémités ; on le fend dans le sens de la longueur en promenant intérieurement suivant une génératrice une tige de fer rougie, puis en touchant avec le doigt mouillé un des points chauffés.

On arrive au même résultat en se servant d'un diamant attaché à un long manche, qu'on guide à l'intérieur du manchon à l'aide d'une règle en bois. Ce mode

d'opérer donne une cassure plus droite et, par suite, occasionne moins de déchet.

Pour des manchons de grandes dimensions, le souffleur a recours à l'expédient dont nous avons parlé à propos de la fabrication des touries, et qui consiste à injecter en même temps que l'air une certaine quantité d'eau-de-vie qu'il tient dans la bouche. Ce mode d'opérer n'est plus usité ; on lui a substitué l'emploi de la pompe Robinet, et plus généralement le soufflage à l'air comprimé, dont l'emploi est appelé, dans l'avenir, à se généraliser.

Verres cannelés. — Les verres cannelés, qui sont fréquemment employés pour la propriété qu'ils possèdent de laisser passer la lumière, sans laisser pénétrer les regards (propriété qu'ils doivent à un phénomène de réfringence), sont fabriqués par le procédé que nous venons de décrire, avec cette seule différence que la paraison est soufflée au début dans un moule présentant des cannelures. Ces cannelures doivent être plus profondes que celles que doit présenter la feuille de verre, car il faut prévoir et parer à la diminution de profondeur qui résultera de l'allongement du cylindre.

61. — Fours à étendre. — Quand le manchon est froid et fendu, on le porte dans un four spécial sur la « pierre à étendre » qui doit être aussi plane et à grain aussi fin que possible. On le chauffe à une température suffisante pour le ramollir ; à ce moment, un ouvrier, armé d'une longue perche de bois, fait sur le cylindre une légère pression, puis achève d'aplanir la feuille à l'aide d'un rabot mouillé, en bois blanc, qu'il promène sur la surface.

Les pierres à étendre sont constituées par des produits

en terre réfractaire ayant sensiblement pour composition :

Terre grasse crue...........	4
Débris de pierre à étendre...	2
Écailles de pots	1

et encore :

Terre grasse crue...........	2
Même terre grasse cuite......	1

Ordinairement, on n'étend pas directement le manchon sur cette pierre, on la recouvre de lames de verre appelées lagres sur lesquelles on jette du sulfure d'antimoine, et c'est sur ce support que le manchon de verre est aplani. Le verre perd ainsi beaucoup moins de son poli.

Pour l'étendage, on a d'abord fait usage de fours dits à « pierre fixe » (planche VIII, *fig.* 1).

Après étendage sur cette pierre, la feuille était soulevée à l'aide d'une fourche et portée à recuire dans un four voisin, chauffé à température moins élevée. Quand ce four était rempli, on enlevait le combustible, on fermait soigneusement toutes les ouvertures et on laissait le refroidissement s'opérer graduellement.

Cette manière de faire présentait l'inconvénient de donner des verres de mauvaise planimétrie et « griffés », c'est-à-dire portant l'empreinte de la fourche.

On a alors essayé l'emploi de pierres à étendre tournantes : elles consistaient en quatre pierres fixées sur un plateau circulaire mobile autour de son axe et placé dans un four disposé de façon telle que la température allait en décroissant de A en D (planche VIII, *fig.* 2).

L'étendage du manchon avait lieu en A ; puis, faisant tourner d'un quart de cercle le plateau dans le sens de

la flèche, on amenait la pierre B, qui à son tour recevait un manchon.

A leur arrivée en D, les feuilles de verre étaient suffisamment refroidies et assez rigides pour pouvoir être transportées dans le four à recuire voisin, sans risquer de se déformer.

Après ce dispositif, qui était un réel progrès, mais qui donnait des produits laissant encore quelque peu à désirer sous le rapport de la planimétrie, sont venus les fours continus dits à « pierre roulante ».

Dans l'un de ces fours (planche VIII, *fig.* 5), ou « stracous », le manchon est étendu sur une plaque A mobile sur des rails.

Après étendage, on pousse cette plaque en B dans un autre compartiment où la température est moins élevée. De là la feuille de verre, suffisamment refroidie, est enlevée à l'aide d'une fourche et placée sur un chariot E qui peut se mouvoir sur des rails dans une galerie, à température décroissante, d'une longueur de 12 à 15 mètres.

Sur le chariot on dispose à plat une dizaine de feuilles de verre; puis, quand il est chargé, on le fait avancer de la longueur suffisante pour laisser place à un chariot vide. A l'extrémité G de la galerie, les chariots arrivent presque froids et sont déchargés.

M. Segard, d'Anzin, a imaginé un four à étendre dit à « pont mouvant », ne différant de celui-ci que par la disposition des pierres à étendre.

Le chariot A portant sa pierre à étendre est muni à sa partie inférieure de rails qui permettent de le mettre en mouvement sur des roues fixes (*fig.* 78, 79).

A 15 centimètres au-dessous de ce chariot, peut se mouvoir, sur des rails fixes, un autre chariot B monté sur roues et muni également d'une pierre à étendre.

Pour étendre les cylindres, on renvoie le chariot B dans le four à refroidir et on fait l'étendage sur le chariot A ; puis, on pousse ce chariot dans le second compartiment. Le chariot B revient ; avec un levier C on l'élève de 15 centimètres avec la plate-forme sur laquelle il est venu se placer. On y dépose le canon à étendre et, pendant qu'il s'ouvre, on enlève avec une fourche la feuille précédemment étendue sur le chariot A, pour la placer sur un chariot en tôle qui se trouve dans la galerie de recuisson.

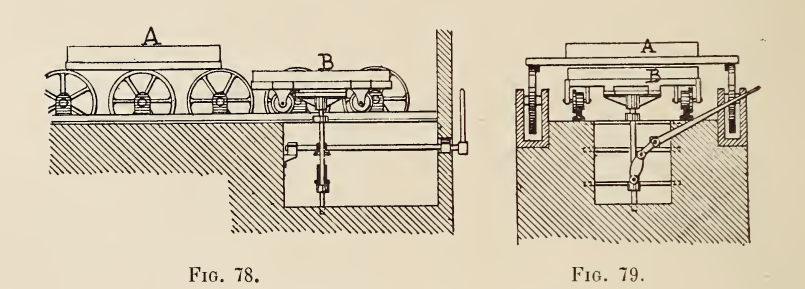


Fig. 78. Fig. 79.

Le nouveau manchon étant étendu, on abaisse le chariot B sur ses rails, on le renvoie dans le four à refroidir et on amène par dessus le chariot supérieur A, sur lequel on étend une autre feuille de verre.

Avec ce système, la dépense est moitié de ce qu'elle est dans un four à une seule pierre roulante.

Afin de rendre le verre bien plan, M. Binet, de Sèvres, dispose au-dessus de la pierre à étendre un plateau mobile en terre réfractaire. Ce plateau, étant abaissé par l'action d'un levier, vient appuyer de tout son poids sur la feuille de verre et en assure la parfaite planimétrie.

C'est surtout pour la fabrication des verres doubles et des glaces soufflées que ce procédé est avantageux. Dans ce dernier cas, il suffit en effet, pour polir les glaces, d'en-

lever le quart de leur épaisseur, alors que par le mode ordinaire d'étendage il fallait en enlever le tiers et même la moitié.

Four à étendre, système Bievez. — M. Bievez, de Haine-Saint-Pierre (Belgique), a imaginé un système de four à recuire les verres à vitres, qui donne d'excellents résultats et qui tend à se substituer à tous les fours dont nous venons de parler.

Le principe consiste à faire mouvoir sur tringles métalliques, et par l'intermédiaire de ces tringles, les feuilles de verre préalablement aplanies sur la sole d'un four à réverbère.

M. Casimir Lambert, de Charleroi, a rendu cette idée réellement pratique en y adaptant le système de chauffage par le gaz.

Dans le procédé Bievez on a évité le double transport des feuilles de verre et, du même coup, les déformations plus ou moins prononcées, mais toujours inévitables, qui en résultaient.

La partie originale du four réside surtout dans le mode de translation des feuilles de verre.

La sole du four à refroidir est constituée par une série de pièces réfractaires placées bout à bout. Dans le sens transversal du four, ces pièces laissent entre elles, à intervalle régulier, un espace vide dans lequel peuvent monter ou descendre des tringles en fer qui ont chacune comme longueur la longueur totale de la galerie de recuisson.

A leur extrémité antérieure — partie froide — ces tringles sont reliées entre elles et rendues solidaires par une barre transversale qui permet de leur donner, à toutes en même temps, un mouvement de translation.

Transversalement au four sont disposés, de distance en distance, sous la sole, des arbres portant chacun autant de galets qu'il y a de rainures ménagées dans la sole. C'est dans une gorge pratiquée dans ces galets que reposeront les tringles qui s'étendent sur toute la longueur du four.

Les extrémités des arbres sont liées rigidement à des barres montantes qui dépassent la voûte du four et qui sont reliées au-dessus de cette voûte par des tirants en fer. Ces barres montantes sont guidées verticalement par des coulisses en fonte fixées dans la maçonnerie du four.

En outre, toutes les barres situées d'un même côté du four sont reliées entre elles. Il en résulte que l'ensemble des arbres et des barres montantes constitue une série de cadres formant un tout rigide, et, comme chacune des barres montantes est équilibrée par un contrepoids, on conçoit qu'il suffit d'un effort très faible pour donner le mouvement à tout le système.

Les figures 80, 81, 82 et la légende qui les accompagne donneront une idée exacte du mécanisme.

Ceci dit, voici comment on opère :

Une première feuille de verre ayant été amenée par le chariot B, l'étendeur placé à l'ouverture K la pousse sur la sole du four. A ce moment, une seconde feuille est amenée par le même chariot ; un ouvrier agit sur la chaîne de manœuvre et lève d'un seul coup tous les cadres et les tringles. La première feuille de verre est soulevée par les tringles et maintenue au-dessus de la sole. Pendant qu'elle est ainsi soulevée, on imprime aux tringles un mouvement de translation en opérant une traction sur la barre transversale, de manière à faire avancer la feuille d'une quantité un peu supérieure à sa largeur. Abandonnant alors la chaîne de manœuvre, on laisse redescendre tout

l'ensemble ; les tringles rentrent dans les rainures, et la feuille de verre s'appuie à nouveau sur la sole du four.

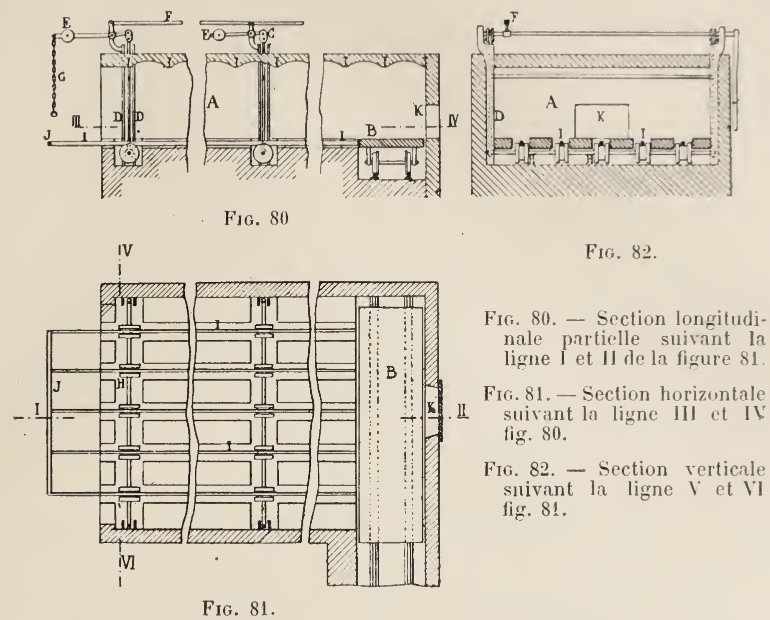


Fig. 80

Fig. 82.

Fig. 81.

Fig. 80. — Section longitudinale partielle suivant la ligne I et II de la figure 81.

Fig. 81. — Section horizontale suivant la ligne III et IV fig. 80.

Fig. 82. — Section verticale suivant la ligne V et VI fig. 81.

A, four à refroidir.
B, chariot ou châssis verticaux mobiles, disposés perpendiculairement au grand axe du four.
D, coulisses dans lesquelles se meuvent les montants des cadres C.
E, contrepoids servant à équilibrer les cadres C.
F, barre longitudinale reliant les côtés supérieurs de tous les cadres.
G, chaîne de manœuvre à l'aide de laquelle on soulève, d'un seul coup, tous les cadres.
H, galets fixés aux côtés inférieurs des cadres.
I, tringles parallèles reposant dans les gorges des galets H, et se logeant dans des rainures disposées dans la sole du four.
J, traverse réunissant, en dehors du four, les tringles I et servant à les tirer d'un seul coup.
K, ouverture pour la manœuvre des feuilles de verre.

On repousse alors les tringles à leur position primitive et on amène à son tour sur la sole du four à refroidir la feuille de verre qui vient d'être étendue.

Dès que cette deuxième feuille est introduite, on manœuvre l'appareil comme il vient d'être dit, c'est-à-dire

qu'on fait place à une troisième feuille en faisant avancer les deux premières, et ainsi de suite. La longueur du four à refroidir est généralement telle qu'il peut s'y trouver à la fois quinze feuilles de verre.

Ce système de refroidissement n'exige que vingt à vingt-cinq minutes, au lieu de sept à huit heures que demandait l'ancien mode d'opérer. La recuisson est très bonne, et le verre se laisse couper très facilement.

On comprend aisément qu'il en soit ainsi, si l'on remarque que les soulèvements successifs de chaque feuille de verre sur des tringles minces permettent un refroidissement à peu près uniforme des deux faces, ce qui ne peut avoir lieu dans les autres systèmes de fours à recuire.

Verre en plateaux

62. — Historique. — Ce verre, qui n'est plus fabriqué qu'en Angleterre, est encore quelquefois appelé verre de France, par suite de ce fait que sa fabrication a été pendant très longtemps en faveur dans les verreries de Normandie, d'où elle a été importée en Angleterre.

Pour cette fabrication, il faut que le verre soit un peu plus fusible que pour la fabrication par le procédé des cylindres.

Voici la composition comparée des deux verres :

	Verre en plateaux	Verre en manchons
Sable	100	100
Sel de soude	40	37
Charbon	2	1,8
Craies	32	35
Bioxyde de manganèse	0,5	0,5
Acide arsénieux	0,5	0,5

63. — Fabrication. — Voici comment M. Chance, le grand fabricant de Birmingham, rend compte de la fabrication : « Lorsque le verre a été amené de l'état de fluidité absolue à celui d'une consistance qui permette de le travailler, l'ouvrier chargé de cueillir le verre plonge sa canne dans le creuset, au milieu de l'ouvreau, en la tournant sur son axe pour égaliser l'épaisseur de la masse cueillie, il enlève à l'extrémité, sur le nez, comme on l'appelle en termes techniques, une masse de verre présentant la forme d'une poire. Posant alors sa canne sur un chevalet, il la tourne doucement, et laisse la surface se refroidir de manière à pouvoir cueillir une deuxième quantité de verre. Lorsque la masse est à la grosseur convenable, l'ouvrier, après avoir refroidi sa canne dans un auget plein d'eau de manière à pouvoir la tenir à la main, commence à rouler le verre sur le marbre ou lit métallique, jusqu'à ce qu'il prenne une forme conique, le sommet du cône formant le bouillon (*fig.* 83). Un gamin souffle alors dans la canne, pendant qu'on marbre encore le verre, et lui fait prendre ainsi la forme d'un flacon florentin, on prépare le rebord que doit plus tard présenter la feuille développée, en roulant la pièce près du nez de la canne, sur l'extrémité du marbre. On chauffe encore la masse, et le souffleur lui fait prendre la forme d'un grand globe. Pendant ce développement, il est nécessaire de maintenir le bouillon exactement dans la position qu'on lui a d'abord donnée, c'est-à-dire sur une ligne qui coïncide avec l'axe de la canne. Pour y parve-

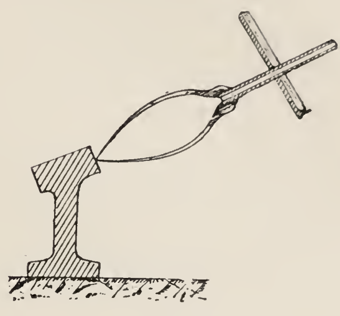


Fig. 83.

nir, le souffleur maintient sa canne sur un support en fer, et, tandis qu'il souffle la masse et la tourne à la fois, un gamin maintient contre le bouillon une pièce de fer qui se termine sous la forme d'une petite capsule.

On présente alors au feu de nouveau, et là, par un tour de main de l'ouvrier, et en dirigeant la flamme d'une certaine manière sur le globe, on aplatit le front de celui-ci; on évite d'ailleurs qu'il ne s'écrase pendant cette opération, en faisant faire à la canne une révolution rapide sur son axe. La pièce ressemble alors à un énorme vase à décanter, dont le fond serait très plat et le col très court. Le bouillon peut encore se voir au centre du fond plat, et c'est alors que l'on se rend compte de son utilité. La canne est maintenue horizontalement sur un chevalet en fer; un ouvrier s'approche tenant à la main une longue baguette en fer appelée pontil, munie à son extrémité d'une petite masse de verre fondu. Il presse cette masse contre une pointe en fer, de manière à lui donner la forme d'une petite capsule, puis l'applique, quand elle en a pris la forme, sur le bouillon où elle adhère bientôt solidement.

La masse ainsi formée prend le nom d'œil de bœuf au bouillon (*fig.* 84). Une incision faite au verre, près du

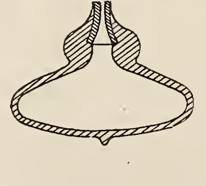


Fig. 84.

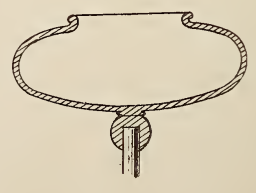


Fig. 85.

nez de la canne, avec un morceau de fer froid, et un souffle vigoureux détachent bientôt la canne, qui quitte

alors la pièce ; on la laisse reposer quelques instants jusqu'à ce que le verre qui y est resté adhérent se soit fendillé (*fig*. 85).

« L'extrémité de la pièce qui se trouvait près de la canne (qui maintenant est détachée) se nomme le nez, et c'est elle qui a donné son nom au fourneau ou « trou de nez » devant lequel on la chauffe pour l'opération suivante.

« Le verre arrive alors à sa dernière et plus terrible épreuve. Il est placé entre les mains d'un homme qui, un voile sur la figure, se tient droit devant un immense cercle de flamme (*fig*. 86) dans lequel il enfonce sa pièce,

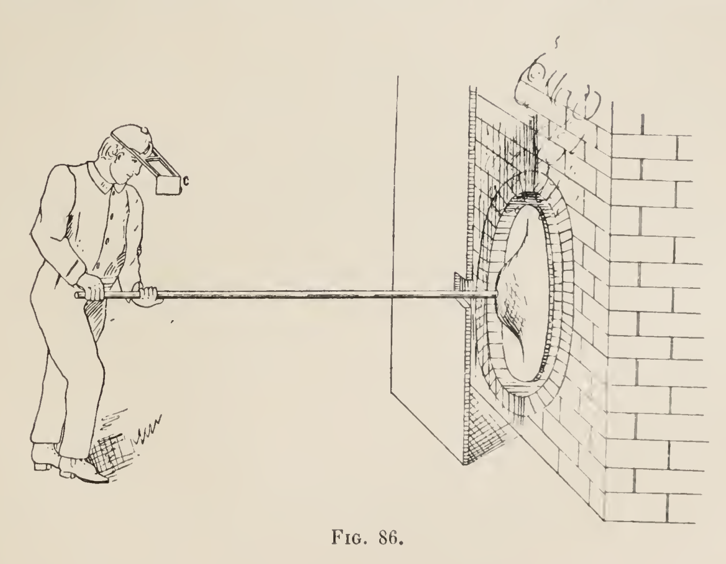


Fig. 86.

tout en tournant rapidement son pontil. L'action de la chaleur et de la force centrifuge combinées produit bientôt son effet ; le nez de la pièce s'étend, les parties qui en sont proches ne peuvent échapper à ce mouvement : l'ouverture devient de plus en plus large ; un instant, la vue saisit au passage la figure d'un cercle avec un

double rebord. Un instant après, le spectateur étonné voit tournoyer devant ses yeux une table circulaire de verre qui, quelques minutes auparavant, gisait dans le pot de verrerie, sans que rien la distinguât du reste de la masse. »

Ces disques ont ordinairement $1^m,50$ de diamètre. Excepté le centre du plateau auquel adhère le pontil, qui présente un bourrelet, l'épaisseur de cette pièce est uniforme.

Ce disque ou plateau, posé sur une aire recouverte de cendres chaudes, est détaché du pontil (comme cela a lieu pour détacher le manchon de la canne), puis avec une longue forche, enfourné horizontalement et dressé dans le four à recuire.

Après recuisson et refroidissement, ces plateaux sont découpés au diamant.

64. — Fabrication des cives. — Nous dirons en passant un mot des petites pièces de verre appelées cives, qui sont employées presque exclusivement à la décoration des habitations. C'est une application en petit de la fabrication des verres en plateaux. Après avoir soufflé sous forme de poire la quantité de matière nécessaire à la confection d'une cive, on en fixe l'extrémité arrondie au bout d'un pontil et on détache la canne. On termine la cive en ouvrant la poire, soit par rotation, soit à l'aide de fers en forme de pincettes.

Méthode employée en Amérique pour la fabrication du verre à vitres. — Il y a environ vingt-cinq ans, William Clarke, de Pittsburg, essaya de fabriquer du verre à vitres en le laminant dans des appareils inversibles, analogues à ceux qui sont employés dans la fabrication du fer et de l'acier.

Cet essai n'eut aucun succès, parce qu'en passant par les cylindres le verre se refroidissait rapidement et devenait trop cassant. Ce procédé vient de devenir pratique par suite de l'emploi du gaz, de sorte que, par ce procédé de laminage, on obtient dix fois plus de verre en feuilles que précédemment.

Les cylindres sont creux et fixes ; un tuyau, percé de trous qui laissent échapper du gaz dans tous les sens, passe par le milieu de chacun des cylindres qui sont ainsi échauffés d'une manière constante.

La masse de verre qui, par le laminage, a été transformée en feuille, passe des laminoirs sur une table en fer qui est également chauffée d'une façon constante par un jet de gaz.

De cette table la feuille va directement dans le four à recuire, de sorte que pendant toute l'opération elle ne peut pas se refroidir.

Les deux modes usités en Europe pour la fabrication des verres à vitres offrent tous deux des avantages et des inconvénients qui tiennent à la façon même de procéder. Néanmoins les avantages du procédé des cylindres sont si nombreux et tellement importants, que cette manière de faire est celle qui est généralement adoptée.

Les dimensions des verres en cylindres sont beaucoup plus grandes que celles des verres en plateaux, leur épaisseur est plus uniforme, ce qui assure une meilleure recuisson; aussi l'équarrissage et la division des feuilles ne produisent que peu de déchets; en outre, la planimétrie laisse moins à désirer.

Les carreaux de verre en plateaux sont toujours plus épais dans la partie qui avoisine le centre du plateau dont on les a tirés que sur les bords ; le noyau qui entourait le pontil est assez saillant et s'étend sur une sur-

face assez considérable pour entraîner à lui seul un notable déchet; en outre, la surface de chaque carreau est toujours plus ou moins gauche, plus ou moins ondulée, ce qui tend à déformer l'image des objets qu'on regarde à travers ces vitres.

Ce défaut de planimétrie est si bien établi qu'on assure qu'une coutume anglaise permet de récuser un témoin qui n'a vu qu'à travers un carreau de vitre le fait sur lequel il vient déposer en justice.

D'un autre côté cependant, l'éclat de ce verre est toujours plus grand que celui du verre fabriqué par le procédé des cylindres, ce dernier étant plus ou moins rayé, martelé ou dévitrifié par l'étendage qu'on lui a fait subir ; la nécessité de presser pour l'étendage la surface lisse qui occupait l'intérieur du manchon, puisque cette surface intérieure est plus petite que la surface extérieure, tend à déformer cette surface, par suite de l'étirage qu'elle doit forcément subir dans le sens de la largeur du manchon, de là des inégalités de la feuille de verre.

On a constaté que les deux faces d'une feuille de verre sont inégalement résistantes à l'action des agents atmosphériques. L'expérience a démontré que la face supérieure, celle qui, dans le four à recuire, est opposée à la pierre sur laquelle elle repose, est plus riche en silice, plus dure, et a souvent plus d'éclat, ce qui est dû à ce que sous l'action de la chaleur cette face a perdu un peu d'alcalis et la majeure partie de l'acide sulfurique, lequel se rencontre toujours comme impureté dans tous les verres fabriqués au sulfate.

On en a déduit cette règle pratique que les vitres doivent toujours être posées de façon que la face supérieure soit placée à l'extérieur, afin de présenter plus de résistance aux agents atmosphériques.

65. — Irisation, resuage du verre à vitres. — Les verres à vitres s'altèrent dans le transport; il se produit un resuage qui donne au verre l'aspect irisé.

On attribuait cette coloration superficielle à une action physique, mais on a reconnu qu'elle était le résultat d'une action purement chimique. Elle est due au départ, sous l'action de l'humidité, d'une certaine quantité de matières alcalines. On atténue l'intensité de cette coloration en frottant les verres avec un chiffon gras, ce qui empêche le contact de l'humidité.

On peut même éviter la production de l'irisation en soumettant les feuilles de verre à un lavage, puis les essuyant avant de les emballer. Ce lavage est d'ailleurs indispensable pour enlever le dépôt très léger de noir de fumée qui se forme dans le four à recuire sur la face supérieure de la feuille de verre.

M. Renard a proposé de laver le verre à l'acide; ce procédé est excellent et on a constaté que le verre ainsi traité se conserve parfaitement à l'usage. Le bain acide est constitué généralement par une solution à 2 ou 3 0/0 d'acide chlorhydrique.

D'après M. Bernard, de Bagneaux, l'immersion successive du verre dans deux bains d'eau non acidulée, mais de température différente (froide d'abord, et ensuite à 60°), prévient aussi l'irisation.

Si nous nous reportons à ce que nous avons dit plus haut au sujet de l'irisation, à savoir que ce phénomène peut être reproduit en exposant le verre à l'action des vapeurs de chlorures, on est amené à penser que le chlorure de sodium — toujours présent dans le sulfate de soude employé en verrerie — n'est pas sans action sur la production du phénomène.

Ce qui confirmerait l'exactitude de cette manière de

voir, c'est que beaucoup de verriers, notamment la Société des verreries d'Aniche, prétendent éviter l'irisation de leurs verres en employant du sulfate de soude contenant 1 0/0 d'acide sulfurique libre, c'est-à-dire d'acide non combiné aux bases.

Un tel sulfate ne pouvant contenir en effet beaucoup de chlorure de sodium indécomposé, et d'autre part ce sel se trouvant, grâce à l'excès d'acide, transformé en sulfate, bien avant que la fusion du verre soit complète, on comprend qu'il ne puisse plus exercer d'action nuisible.

66. — Verre perforé. — M. Émile Trélat a pensé à remplacer les appareils de ventilation généralement très imparfaits, en usage dans les endroits publics, les hôpitaux, etc., par des vitres perforées qui, en même temps qu'elles laisseraient passer la lumière pourraient distribuer l'air nécessaire à la ventilation.

MM. Appert ont résolu la question en faisant les trous dans le verre, en même temps que la feuille de verre elle-même, en opérant par coulage et moulage.

Pour cela, on verse le verre liquide sur une table en métal garnie de saillies ayant la forme et l'espacement des trous que l'on veut obtenir; on exerce sur ce flot de verre une pression suffisante pour l'amener à l'épaisseur voulue, déterminée par des règles de la hauteur nécessaire. Au moment du moulage, les saillies sont recouvertes par le verre; aussi, une fois la feuille terminée, ces saillies sont-elles recouvertes elles-mêmes d'une mince couche de verre qui bouche les trous sur une des faces de la vitre. On en peut opérer le débouchage de plusieurs façons : soit au sable, soit en rongeant par l'acide fluorhydrique, soit à l'aide d'un foret tournant avec rapidité. Ce dernier moyen

est le plus expéditif; avec un foret de section hexagonale tournant à 750 tours par minute, une ouvrière peut déboucher 2400 trous à l'heure. Cet ensemble de procédés a permis de diminuer les frais de fabrication de ce verre et de le livrer au commerce à un prix suffisamment réduit pour en permettre l'emploi d'une façon générale. Ce verre peut être poli sur une ou deux faces ou sur les deux faces par un procédé analogue à celui employé pour le polissage des glaces.

Dans les locaux où une ventilation permanente n'est pas indispensable, on place derrière le verre perforé un vasistas à charnières, muni d'un verre plein qu'on ferme à volonté.

On peut encore superposer deux feuilles de verre perforé et, par un faible mouvement de translation de l'une d'elles, faire coïncider les trous des deux feuilles de verre et produire la ventilation, qu'on interrompt par un mouvement inverse.

Outre l'application de ces verres à la ventilation des hôpitaux, salles d'étude des lycées et écoles, ateliers de filatures, cabinets d'aisances, écuries, etc., ils sont encore fréquemment employés pour clore les ouvertures des garde-manger, pour les tablettes supportant les aliments, et remplacent avec avantage les toiles métalliques, pour des filtrations et des tamisages.

67. — Fabrication des verres de montres. — Cette fabrication est restée pendant longtemps localisée en Lorraine. On souffle des globes qu'on coupe au diamant, en autant de segments que la surface du globe peut en contenir, à l'aide de machines spéciales permettant de découper des verres ronds ou ovales. Une fois détachés, les verres bruts reçoivent, au moyen de meules,

le biseau circulaire qui permet au verre d'entrer et de rester maintenu dans la gorge du couvercle de la montre appelé drageoir.

A cause de leur forte courbure, ces verres servent aux montres épaisses.

Pour les montres plates, on a pendant longtemps usé à la roue des lames de verre plates.

On opère maintenant de la façon suivante : on souffle des boules d'un diamètre très considérable, jusqu'à $1^m,50$, ce qui correspond à une capacité de 1 760 litres environ ; et c'est dans ces boules, dont la surface présente une courbure très faible, qu'on découpe les verres.

On en diminue la concavité, s'il y a lieu, en plaçant chaque rond de verre sur un cylindre dont la partie supérieure est façonnée en portion de globe très aplati, et en soumettant le tout à la chaleur d'un four à réverbère dans un petit moufle; ces verres prennent alors la forme du moule sur lequel ils ont été posés. A leur sortie du moufle, il ne reste plus qu'à les polir et à faire le biseau au moyen de la meule.

Le verre destiné à la fabrication des verres de montre doit être très peu hygrométrique et posséder une grande dureté, afin de résister aux frottements auxquels, par destination, il doit être soumis.

On le prépare généralement avec la composition :

Sable..................	65
Carbonate de soude.....	17
Carbonate de potasse....	6
Chaux..................	10
Nitrate de soude........	2

Cylindres de pendules. — On les obtient de la façon suivante : le manchon ayant été amené au point où il ne

reste plus qu'à enlever les deux calottes, l'ouvrier réchauffe l'extrémité, puis, retournant sa canne, le cylindre en haut, il la maintient dans cette position. L'extrémité du cylindre fléchit et rentre dans l'intérieur du manchon.

On lui donne une forme régulière par réchauffage et nouveau soufflage. On détache alors le cylindre de la canne et on coupe régulièrement l'ouverture de ce dernier manchon qui constitue un cylindre.

Les cylindres ovales ou carrés s'obtiennent en soufflant la masse de verre, qui doit leur donner naissance, entre des pièces de bois convenablement disposées.

CHAPITRE IV

GLACES ET PRODUITS SPÉCIAUX

§ 1. — Glaces

68. — Historique. — Nous avons dit en commençant cet ouvrage comment la fabrication des glaces avait été introduite en France par Colbert.

Nous rappellerons ici que la méthode de soufflage appliquée par les Vénitiens fut remplacée par la méthode de coulage, inventée par Abraham Thévart et rendue réellement pratique par les travaux de Louis Lucas. de Nehou.

Les premiers fours à glace étaient chauffés au bois, de même d'ailleurs que les fours à bouteilles et à verres à vitres. C'est ce qui explique la situation des verreries d'ancienne création au centre ou dans le voisinage immédiat des forêts.

On avait bien essayé, dès 1752, à Tour-la-Ville (Normandie), et ensuite vers 1770, à diverses reprises, à Saint-Gobain, de substituer la houille au bois, mais les essais n'avaient pas été couronnés de succès.

Ce n'est qu'en 1829, que Saint-Gobain construisit le premier four chauffé à la houille ; encore faut-il ajouter

que le verre était fabriqué en deux fois ; l'affinage était fait au bois, après « trejetage ». Deux fours fonctionnaient simultanément ; dans l'un, chauffé à la houille, on fondait le verre dans des pots fixes ; dans l'autre, alimenté au bois, on apportait, on « tréjetait » le verre fondu et on l'affinait.

Ce mode d'opérer fut établi, en 1842, à Sainte-Marie-d'Oignies par M. Kemlin.

En 1843, M. Houtart-Cossé construisit le premier four à la houille, avec travail complet dans le même four, sans tréjetage.

Une amélioration considérable fut apportée vers 1859, par la substitution du chauffage au gaz au chauffage direct par la houille. Les fours à gaz à chaleur régénérée, construits à cette époque par MM. Siemens, ont permis de réaliser sur l'ancien mode de chauffage une économie notable de combustible. Ce four ayant été décrit plus haut le lecteur voudra bien se reporter aux planches. Nous nous occuperons immédiatement de la fabrication proprement dite des glaces.

69. — Matières premières. — Le verre à glaces est un silicate de soude et de chaux qu'on obtient par la fusion d'un mélange de sable, de calcaire et de sulfate de soude additionné de charbon.

Les qualités essentielles de ce verre, celles qui priment toutes les autres et que les connaisseurs éclairés mettent bien avant la question du prix de revient, sont une parfaite limpidité et l'absence de toute coloration.

La première de ces qualités est communiquée au verre par un feu très violemment et surtout très régulièrement soutenu pendant un temps fort long; elle intéresse directement la fabrication et est dépendante de la marche du

four et du soin apporté dans la préparation des creusets.

La seconde qualité ne peut être obtenue que par l'emploi de matières premières très pures, qui doivent être choisies avec un soin minutieux et être absolument exemptes de sels de fer. Il ne peut être question en effet, dans la fabrication du verre à glaces, de marquer la teinte que produiraient les sels de fer, en incorporant dans ce verre un oxyde décolorant tel que les oxydes de manganèse ou de cobalt. Ces décolorants n'ayant qu'une action fugitive, on verrait apparaître après un temps plus ou moins long la teinte verte si désagréable ou une teinte jaunâtre d'un plus vilain aspect encore, qu'on constate si fréquemment dans les verres à vitres.

Les matières premières doivent donc être très pures, aussi n'emploie-t-on que des sables absolument blancs et reconnus non ferrugineux par l'analyse. Ces sables proviennent généralement en Europe, de Fontainebleau, de Nemours ou de Champagne.

Le calcaire dont on fait usage est tiré des bancs de calcaire carbonifère du Nord de la France, de Landelies (Belgique), d'Aix-la-Chapelle, etc. Quoique d'un aspect gris noirâtre, ce calcaire est très peu ferrugineux et donne par la calcination une chaux bien blanche.

Le sulfate de soude provient de la décomposition du sel marin par l'acide sulfurique. Afin de l'avoir bien pur, on se voit dans l'obligation d'opérer cette décomposition dans des cuvettes en plomb.

Le charbon de bois qu'on ajoute afin d'amener la décomposition du sulfate de soude et permettre à la soude d'entrer en combinaison avec la silice, est également choisi avec les plus grands soins.

Une pratique générale consiste à ajouter aux matières ci-dessus désignées une certaine quantité d'acide arsé-

nieux auquel on accorde la propriété de favoriser l'affinage du verre par suite de l'agitation que sa sublimation communique au mélange fondu.

On fait entrer également dans les compositions vitrifiables une certaine quantité de calcin — déchets provenant de la découpe des glaces ; — ce calcin est aussi utilisé pour l'enverrage des creusets neufs.

Nous regrettons de ne pouvoir ici, comme nous l'avons fait pour le verre à bouteilles et le verre à vitres, nous étendre sur la composition des mélanges vitrifiables employés en glacerie. La situation de l'un de nous nous oblige à une grande réserve, que voudra bien nous pardonner le lecteur.

Nous nous contenterons de dire que, d'une manière générale, on se trouvera bien, au point de vue de la blancheur du verre, d'employer des compositions le plus siliceuses possible et de mélanger à poids égaux le sulfate et le calcaire.

En ce qui concerne le calcaire, on fera bien de l'introduire avec modération. L'expérience a démontré, en effet, qu'ajouté en trop grande quantité il nuit à la résistance du verre, à son homogénéité et à sa teinte, qui est rendue plus accentuée

Mélange des matières vitrifiables. — A l'exception du calcaire et du charbon de bois, les matières premières sont livrées à l'industrie des glaces à l'état de poudre ou de grains suffisamment ténus pour qu'ils puissent être employés sans broyage préalable.

Comme broyeur de calcaire, nous recommandons le broyeur américain à mâchoires contruit par la Compagnie de Fives-Lille. Pour achever la pulvérisation nous conseillons d'employer le broyeur Lacop, qui donne un pro-

duit très finement pulvérisé sans introduire dans les matières broyées de notables proportions de fer.

Le charbon de bois, plus tendre, est broyé sous des meules en pierre ou en fonte.

Il faut rendre aussi parfait que possible le mélange des matières ; on évitera ainsi nombre d'inconvénients dans le travail de fusion du verre, en même temps qu'on rendra ce produit plus limpide et plus homogène. Un mélange imparfait amène en effet des irrégularités dans la durée de la fusion et la production au milieu de la masse de verre de parties infondues ou simplement moins plastiques qui laissent leur trace sous forme d'ondes, de fils, lesquels enlèvent à la glace une partie de sa transparence.

Pendant longtemps le mélange était fait à la pelle par des ouvriers mélangeurs. Il est préférable et beaucoup plus économique de l'effectuer mécaniquement dans des appareils dont la forme peut être très variable.

Les uns sont constitués par un tambour à l'intérieur duquel sont disposées des cloisons, inclinées l'une sur l'autre, qui reçoivent et rejettent successivement les matières. A l'extrémité de ce tambour se trouve une hélice qui enlève les matières mélangées.

D'autres appareils ont la forme de pétrins dans lesquels les matières sont brassées à l'aide de deux palettes courbes en acier se mouvant en sens inverse et avec des vitesses différentes.

Quelle que soit la forme que présentent ces appareils, les matières mélangées sont soumises ensuite à un tamisage, puis enlevées pour être conduites au four.

70. — Fonte du verre. Affinage. — Un four à glaces (voir planche IX) contient un nombre de pots ou creusets qui peut varier de douze à vingt-quatre.

Il est de pratique générale de remplir simultanément plusieurs creusets et de ne procéder à l'enfournement qu'après avoir réchauffé fortement le four.

On a reconnu que cette manière de faire avait pour avantage de donner lieu à une fonte plus rapide et plus régulière de toute la masse contenue dans le creuset.

Par la fusion, les matières prennent un retrait considérable ; aussi, pour obtenir après fusion un pot complètement rempli, est-on obligé de procéder à un second, puis à un troisième enfournement, qui doivent être effectués chacun avant que la matière de l'enfournement précédent soit complètement fondue.

Quand la fusion est complète, ce dont on se rend compte en cueillant dans le creuset à l'aide d'une tige en fer « cordeline », commence la période la plus délicate du travail du verre, « l'affinage ».

Ce travail consiste à rendre le verre très fluide afin de faciliter le départ, l'élimination des bulles gazeuses, ou « point », qui proviennent des réactions auxquelles la fusion a donné naissance. C'est de la perfection avec laquelle cette opération est conduite que dépend la qualité des glaces.

Un affinage n'est bien fait que si le verre est exempt de bulles ; et ce résultat ne peut être atteint que si le verre est amené à l'état d'un liquide presque aussi mobile que l'eau. On comprendra facilement combien cette opération est délicate, si on se rappelle qu'on n'a pu, jusqu'aujourd'hui, l'exécuter que dans des récipients en argile qui, pour être très réfractaires, ne sont cependant pas infusibles et peuvent être ramollis sous l'action du feu violent que nécessite l'affinage.

On se trouve donc placé entre deux écueils : ou bien développer une trop haute température, ce qui expose à

ramollir les creusets et à les voir s'ouvrir sous le poids du verre ; ou bien modérer l'intensité du feu, ce qui a inévitablement pour résultat de donner lieu à un affinage imparfait.

L'objectif du fabricant de glaces doit donc être, pour une nature déterminée de creusets, de se maintenir entre ces deux extrêmes ; mais surtout il cherchera à améliorer les conditions de résistance de ses creusets, afin de pouvoir, sans inconvénient pour ces derniers, pousser le feu à l'extrême limite.

Nous dirons maintenant un mot des réactions qui se passent dans le creuset. Frémy les a étudiées et établies de façon très nette, il les représente comme suit[1]:

La silice agissant sur le sulfate de soude en présence du charbon peut donner lieu aux composés ci-après:

$$SiO^3 + NaOSO^3 + C = SiO^3NaO + CO + SO^2$$
$$SiO^3 + NaOSO^3 + 3C = SiO^3NaO + CO + S$$

On peut, d'autre part, admettre que le charbon n'agit que sur une partie du sulfate et qu'ensuite l'excédent de sulfate de soude réagit sur le sulfure de sodium formé, d'après les équations :

$$NaOSO^3 + C^4 = 4CO + NaS$$
$$NaS + NaOSO^3 + SiO^3 = SiO^32NaO + SO^2 + S.$$

Frémy s'est assuré que cette dernière réaction se passe réellement dans le four, en opérant par synthèse et en formant du silicate de soude par la calcination d'un mélange de silice, de sulfate de soude et de sulfure de sodium.

[1] FRÉMY, *Sur l'affinage du verre. Comptes rendus de l'Académie des sciences*, t. XXXI.

Il a reconnu que, dans ce cas, le soufre et l'acide sulfureux se dégageaient dans les proportions indiquées par la formule.

Le sulfate de soude peut être transformé en sulfure aussi bien par un gaz réducteur, hydrogène ou carbure d'hydrogène, que par le charbon.

Il en résulte que, si, dans la fabrication du verre, lequel renferme toujours un peu de sulfate non décomposé, il vient à se produire, sous l'action des gaz du four, une réduction de ce sulfate, le verre recommence à « travailler » et reprend du « point » par suite de l'action du sulfate sur le sulfure.

Ces deux composés se détruisant mutuellement, on ne peut être garanti de l'absence du sulfure (qui donnerait une coloration jaune) qu'à la condition d'avoir pendant les fontes un excès de sulfate. Il faut donc conserver un excès de sulfate et chercher à l'éliminer ensuite, au moment de l'affinage, en évitant que le sulfure de sodium produit puisse pénétrer dans l'intérieur du creuset.

Comme en raison de sa densité plus faible et de sa mobilité plus grande, le sulfate en excès remonte à la surface du verre, on l'élimine en le réduisant soit à l'aide de bûchettes, soit avec de la poudre de charbon de bois. Instantanément, la réaction du sulfate sur le sulfure se produit, et, s'il y a un léger excès de charbon, il est éliminé ensuite par l'oxygène des gaz qui traversent le four.

Accidentellement, il arrive qu'après l'affinage on aperçoit à la surface de certains creusets un peu de « sel », ou sulfate de soude non combiné. Comme il n'est plus possible, à une période aussi avancée du travail, de l'éliminer par l'action du charbon, on se voit obligé de l'enlever avec une cuillère. On devra prendre la précaution de bien sécher cette cuillère avant de la mettre en con-

tact avec le sel, car la décomposition instantanée de l'eau donnerait lieu à une détonation qui pourrait nuire à la solidité du creuset et à l'état de la voûte du four.

Nous avons dit que l'affinage devait être poussé au point d'amener le verre à l'état d'un liquide en ébullition. Il arrive fréquemment, pendant cette période, que le verre déborde du creuset sous forme de mousse légère qui se répand sur la sole du four où il se charge d'impuretés. Ce produit impur appelé « pycadil » est recueilli dans des chambres dites « poches à verre » disposées à cet effet sous la sole du four.

On doit chercher à éviter la production de ce pycadil, car il exerce une action corrosive très énergique sur les matériaux qui constituent le siège du four et des poches à verre.

Quand l'affinage est terminé, on laisse graduellement baisser la température du four, de manière à amener le verre à l'état de consistance convenable pour qu'on puisse le couler sans inconvénient.

Pendant ce refroidissement, appelé « braise » ou « tise-froid », le « point » achève de remonter à la surface.

Pendant la braise, la surface du verre contenu dans le creuset se refroidit plus rapidement que la masse intérieure ; la couche supérieure est amenée à un état plus pâteux, moins fluide que les parties occupant le centre et le fond des creusets. Aussi, afin de donner à toute la masse l'homogénéité nécessaire à un bon coulage, procède-t-on, quelques minutes avant de couler, à un léger réchauffage.

71. — Coulage (voir planche X). — Les creusets sont sortis du four à l'aide d'une pince montée sur roues, pince dont les mâchoires viennent s'engager dans une

rainure pratiquée à dessein sur le pourtour du creuset. Après sa sortie du four, ce dernier est placé sur un chariot qui l'amène jusqu'à une grue, laquelle est munie de tenailles permettant de l'enlever. Il est alors amené au-dessus de la table de coulage, puis, manœuvrant les bras de la tenaille, on en renverse sur la table le contenu. Le verre pâteux commence à s'étendre de lui-même ; on en continue l'étendage à l'aide d'un gros rouleau en fonte qui se déplace sur la table dans le sens de la longueur de celle-ci.

Le rouleau s'appuie à ses deux extrémités sur des tringles en fer dont l'épaisseur est en rapport avec l'épaisseur que l'on veut donner à la glace.

Avant de couler une glace, on saupoudre la table à l'aide de sable fin. Si on ne prenait pas cette précaution, on s'exposerait à voir se fendiller, se craqueler, se soulever la surface de la glace, en contact avec la table ; en outre, il y aurait entre celle-ci et la glace une adhérence telle que le transport de la glace dans le four à recuire ne pourrait s'effectuer sans de sérieuses difficultés.

Après avoir été laminée sur la table, il faut en effet que la glace soit rapidement enlevée et introduite dans un four à recuire ou « carcaise », qui a été, au préalable, porté à la température du rouge sombre, et qu'on laisse ensuite refroidir graduellement et très lentement.

Le refroidissement dure en général de trois à quatre jours.

La carcaise doit être portée à une température au moins égale à celle que possède la surface supérieure de la glace qu'on y enfourne, de façon que les parties superficielles de la glace s'y réchauffent et redeviennent aussi malléables que les parties centrales.

Dans la planche XI nous indiquons la disposition généralement adoptée pour les carcaises.

Une carcaise est un four à voûte elliptique très basse, chauffé par deux foyers, l'un à l'avant, l'autre à l'arrière. La sole est constituée par des briques posées de champ et reposant sur un lit de sable. On assure ainsi à toutes les parties de la sole une libre dilatation, ce qui est essentiel pour conserver aux glaces une parfaite planimétrie. La sole est d'ailleurs parfaitement dressée à la règle et au niveau avant le chauffage.

Une large ouverture pratiquée à l'entrée de la carcaise permet l'enfournement et la sortie des glaces; cette ouverture est obturée par des châssis mobiles en tuiles réfractaires ou en tôle, qu'on soulève pour laisser passage aux glaces.

A l'arrière, on ménage des regards qui sont fermés pendant le chauffage à l'aide de plaques « ferrasses » en tôle, et qui ensuite sont ouverts graduellement à mesure que s'avance la période de refroidissement.

Le mode de recuisson des glaces en carcaise est très coûteux, puisqu'il nécessite un chauffage à chaque opération. Ces chauffage et refroidissement successifs ont, en outre, pour inconvénient de fatiguer énormément la maçonnerie. Aussi est-il probable qu'on cherchera à améliorer ce procédé, en disposant par exemple un four à recuire continu basé sur le principe des fours à recuire dont nous avons parlé à propos du verre à vitres, et dont l'étenderie Biévez est un type des plus parfaits.

72. — Découpe des glaces. — Après refroidissement complet, la glace est sortie de la carcaise, puis soumise à une visite minutieuse ayant pour objet la

recherche des défauts, de natures diverses, qui peuvent exister dans les glaces.

On procède ensuite à l'élimination des défauts et à l'obtention de volumes de grandeur déterminée, par la découpe ou « équarrissage » qui s'effectue à l'aide de petites roulettes en acier, ou « molettes », *a*, qui sont enchâssées et mobiles dans une monture en fer M (*fig.* 91).

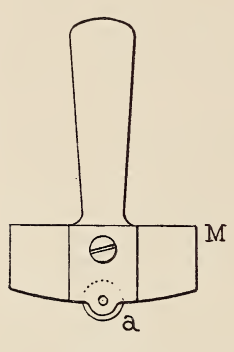


Fig. 87.

La découpe est une opération qui doit être faite avec soin, car elle donne lieu à un déchet qui varie notablement selon la façon plus ou moins intelligente dont elle est conduite.

D'autre part, ce travail n'est pas sans présenter de sérieux dangers pour la manœuvre des glaces de grandes dimensions.

Découpage du verre par l'étincelle électrique. — Ce procédé, qui est employé avec succès pour la découpe des objets de forme cylindrique, n'a pas jusqu'ici donné de bons résultats pour la découpe de grands volumes à surface plane.

Pour les objets de faibles dimensions, on a cependant quelquefois recours à l'emploi de l'étincelle électrique.

On se sert d'une plaque rectangulaire en caoutchouc durci qui est traversée par un fil de laiton, lequel fait légèrement saillie et qui est relié par dessous à l'un des pôles d'une batterie de piles ou d'accumulateurs.

L'autre pôle est relié à un conducteur souple tenu à la main par l'opérateur.

Pour découper un morceau de verre, on le fait glisser

sur la plaque en caoutchouc, tout en maintenant le pôle mobile en regard de la pointe fixe en laiton qui a été humectée d'huile au préalable. Il jaillit des étincelles qui, traversant la plaque de verre, y produisent de petits trous suivant lesquels on peut briser la feuille à découper.

Moyen de percer le verre. — On se voit souvent dans l'obligation de percer des trous dans des plaques de verre. On y réussit très facilement en se servant, comme vrille, d'une pointe très effilée, trempée très dur, au mercure. On humecte constamment la partie en travail avec une solution saturée de camphre dans l'essence de térébenthine. Dans ces conditions, le verre se laisse percer presque aussi facilement et avec autant de netteté que le bois.

TRAVAIL MÉCANIQUE DES GLACES

Doucissage. — Savonnage. — Polissage

A leur sortie des carcaises, les glaces ne sont pas transparentes, leurs surfaces sont rugueuses et imparfaitement parallèles. Il s'agit d'obtenir un parallélisme parfait des faces et de donner la transparence aux glaces.

On obtient ce résultat en soumettant les glaces brutes à trois opérations successives qui portent les noms de doucissage, savonnage, polissage.

73. — Doucissage. — Les appareils à doucir travaillent les surfaces brutes par frottement sur ces sur-

faces, de lames en fonte ou en fer avec interposition de grès ou gros sable, puis de sable fin.

Remplaçant ensuite le sable par de l'émeri de grosseur décroissante, on obtient le savonné.

Quant aux appareils à polir, ils fonctionnent par frottement de feutres sur les surfaces savonnées, avec interposition d'oxyde de fer, ou « potée ».

Le travail des glaces, qui se faisait entièrement à la main jusqu'en 1768, a été rendu mécanique presque aussitôt l'apparition de la machine à vapeur. Il paraît certain, en effet, que la seconde machine à vapeur, construite par Boulton et Watt, de Birmingham, a été appliquée au travail de doucissage de la glacerie de Ravenhead.

En 1824, un grand progrès fut réalisé par Hoyau, qui rendit mobiles la glace et l'appareil frottant. La glace à travailler était fixée horizontalement sur un châssis à mouvement excentrique par rapport au mouvement circulaire du plateau ou ferrasse frottante.

Vers 1815, M. Carillion imagina un appareil à doucir dans lequel la glace était animée d'un mouvement longitudinal alternatif, tandis que le frotteur ou moellon recevait un triple mouvement: il tournait sur lui-même tout en pouvant se mouvoir longitudinalement et transversalement.

Ces appareils n'ont pas donné les résultats sur lesquels on comptait; aussi ont-ils été complètement abandonnés.

En 1868, la Compagnie de Floreffe fit breveter des appareils basés sur le principe du tour appliqué au dressage.

Nous ne parlerons pas de cet appareil, non plus que d'une infinité d'autres, plus ou moins rationnels, qui ont été inventés depuis cette époque. Nous dirons seulement

un mot d'un des plus récents, qui nous paraît donner de bons résultats.

La table en fer ou en fonte, portant les glaces, est animée d'un mouvement de rotation autour d'un pivot placé à son centre.

Deux plateaux frotteurs pouvant être animés d'un mouvement de rotation sont supportés par un chariot transversal, mobile sur quatre roues. Ils sont munis de lames en fonte qui tournent au-dessus de la table et servent à doucir les glaces.

Le double mouvement de rotation de la table et des plateaux donne à l'appareil une puissance très considérable.

Certaines plates-formes ont un diamètre qui atteint 6 mètres et même 7 mètres, elles peuvent donner de 1 500 à 1 700 mètres de glaces par mois. La table fait habituellement trente-cinq tours par minute.

74. — Savonnage. — Après le doucissage, les glaces sont savonnées, en les frottant verre sur verre, avec interposition d'émeris de grosseur décroissante. Jusqu'en ces derniers temps le savonnage était exécuté à la main ; mais, le prix de la main-d'œuvre augmentant avec les difficultés de travail des pièces de grandes dimensions, on a imaginé des appareils mus mécaniquement.

Ces appareils, qui sont de deux genres, ont entre eux plusieurs points communs, à savoir, que la glace supérieure, frottante seule, est mobile, et que le mouvement dont elle est animée est la reproduction du mouvement de huit allongé qui est exécuté dans le travail à la main.

En outre, dans les deux systèmes, les glaces sont appliquées sur la table inférieure fixe, par interposition de toiles mouillées qui empêchent le glissement.

Dans le premier genre d'appareils, on donne le mouvement à la glace mobile à l'aide de deux bras de levier qui, partant du moteur, aboutissent à une caisse en bois qui pèse sur la glace mobile et lui transmet son mouvement. L'un des leviers est en retard sur l'autre, d'où il résulte que la caisse et la glace se meuvent alternativement de gauche à droite et de droite à gauche.

Le second système, dû à M. Delmarmol, est à un seul levier qui, à lui seul, donne le même mouvement que cidessus. Cet appareil a sur le premier l'avantage d'occasionner moins de casses, par suite de ce fait que, la caisse n'étant attaquée que par un point au lieu de deux, elle ne tend plus à pivoter entre ces deux points et laisse moins facilement échapper la glace mobile. En outre, l'appareil à un levier est de construction moins coûteuse et permet de commander à la fois quatre tables au lieu de deux.

75. — Polissage (planche XII).— Le polissage à bras a été depuis fort longtemps remplacé par le travail mécanique. Dans les premiers appareils mus mécaniquement, la table supportant la glace ainsi que les frottoirs de fonte étaient animés d'un mouvement rectiligne de va-et-vient.

Dans les appareils récents qui ont complètement remplacé les premiers, on n'a conservé le mouvement rectiligne que pour la table, et on a donné aux frotteurs un mouvement de translation circulaire.

Cet appareil consiste en un grand châssis carré en fonte, qui repose au-dessus de la table sur six manivelles et est relié transversalement par trois lignes de poutrelles entre lesquelles sont maintenues les broches des polissoirs. Ces derniers, qui sont généralement au nombre de dixhuit, font quatre-vingts révolutions par minute. Ils

peuvent en huit heures polir un côté de glace, alors qu'auparavant il fallait douze ou quinze heures pour polir une surface de moitié plus petite.

Appareils à sceller les glaces. — Une des difficultés les plus sérieuses du travail du polissage est le scellage des glaces sur la table.

On se servait et on fait encore usage en Belgique d'un appareil se composant d'un châssis mobile dans lequel sont assujetties deux ou trois glaces épaisses formant une surface plane.

Ce châssis se meut à la manière d'un couvercle à charnières, au moyen de chaînes et de cabestans; il s'ouvre pour recevoir les glaces à sceller et se referme pour les déposer sur la table à polir.

Mais dans ce mouvement les glaces s'échappent facilement; aussi cette manœuvre est-elle assez dangereuse pour les ouvriers qui en sont chargés.

Un appareil d'invention récente, originaire de l'Allemagne, permet d'éviter ces inconvénients.

Il se compose d'une charpente de 3 mètres de hauteur, portant un arbre horizontal en fer, auquel un cabestan peut donner un mouvement de rotation. Deux chaînes enroulées autour de cet arbre peuvent par leurs mouvements faire monter ou descendre deux forts disques en fonte, qui sont percés chacun de six trous dans lesquels on enfonce des broches attachées aux extrémités des tables à polir.

Dans cette position, l'appareil permet d'élever ou d'abaisser simultanément deux tables à polir entre lesquelles sont placées les glaces à sceller. Au moment où ces deux tables sont élevées, on leur imprime un mouvement de rotation, en sorte que celle de dessous revient en

dessus; les glaces posées sur la première table se trouvent sur la seconde et s'y scellent sur la couche de plâtre qui a été coulée à l'avance sur cette table.

On redescend les deux tables, on enlève celle qui était primitivement au dessous, et l'autre va au poli avec les glaces scellées.

On comprend qu'avec cette disposition il soit impossible aux glaces de s'échapper pendant la manœuvre. Cet appareil donne d'excellents résultats en ce qui concerne la casse; les opérations de scellage se font très rapidement. Ce système permet, en effet, de sceller plus de 4000 mètres par mois.

Dans le travail du doucissage, la glace perd environ le tiers de son épaisseur, soit par conséquent le tiers de son poids. Cette énorme quantité de verre est perdue totalement et est jetée avec les boues provenant du doucissage; le tout forme des amas encombrants dont l'enlèvement est encore une nouvelle cause de dépenses.

En présence d'un tel déchet, on comprend combien il est d'un haut intérêt de chercher à obtenir à la fabrication, des glaces parfaitement planes, afin de diminuer le plus possible le travail du doucissage qui a de si grands et de si coûteux inconvénients.

76. — Résistance comparée du verre brut et du verre poli. — Le verre poli présente à épaisseur égale une résistance à la flexion de beaucoup supérieure à celle que possède le verre brut. On pourra s'en rendre compte par l'examen du tableau ci-dessous :

Essais de résistance du verre de Saint-Gobain, à la flexion.

Résultats obtenus par M. Thomasset (1876-1877) et communiqués à la Société des ingénieurs civils

VERRE BRUT			VERRE POLI	
Numéros	Épaisseur	R = Coefficient de rupture par centim. c.	Épaisseur	R = Coefficient de rupture par centim. c.
	millim.		millim.	
1	30	291,75	10	297,2
2	30	242,86	10	351,9
3	30	292,65	10	405,0
4	27	290,65	12	288,0
5	26	277,63	11,7	282,70
6	24	230,80	11,5	284,30
7	23	272,80	11,5	314,18
8	20	275,70	9,7	284,40
9	18	239,50		
10	16,2	261,30		
11	16	209,39		
12	13	229,20		
13	11,7	271,80		
14	11,2	259,77		

Verre brut... Moyenne des essais R = 260,414
Verre poli... — R = 343,460

Résultats obtenus à l'entrepôt de la Compagnie rue de Boucry (Paris)

VERRE BRUT			VERRE POLI	
Numéros	Épaisseur	R = Coefficient de rupture p. cent. car.	Épaisseur	R = Coefficient de rupture p. cent. car.
	millim.		millim.	
1	27	207,0	20,5	239,0
2	24	271,4	20,5	336,0
3	23	176,0	20,0	321,4
4	21	264,5	19,0	283,0
5	19	259,0	18,0	344,0

Moyenne des essais faits à l'entrepôt, nos 1 à 5, le 4 septembre 1877, en présence de M. Barois, ingénieur du Trocadéro.

Dalles brutes... R = 235,6
Dalles polies.... R = 324.7

Ces résultats mettent bien en relief la supériorité, comme résistance, à égalité d'épaisseur, du verre poli sur le verre brut.

Préparation des glaces pour miroiterie. — Le pouvoir réflecteur du verre étant trop faible pour que cette substance puisse servir directement comme miroir, la transformation des glaces en miroirs est obtenue en rendant le verre non transparent, par dépôt sur une de ses faces, d'une couche mince d'un métal réfléchissant la lumière.

Trois procédés sont en usage : l'étamage au mercure, l'argenture et le platinage.

77. — Étamage. — On étend une feuille d'étain un peu plus grande que la glace à étamer sur une grande table de marbre bien dressée, placée horizontalement et encastrée dans un châssis en bois muni de rigoles.

A l'aide d'une brosse, patte de lièvre, on enlève tous les plis de la feuille d'étain et on la rend parfaitement adhérente à la table.

On « mouille » l'étain en répandant à sa surface un peu de mercure, puis on augmente la quantité de mercure en le maintenant sur la feuille à l'aide de petites bandes de verre poli placées sur les côtés et à l'un des bouts de cette feuille.

A l'autre bout de la table, l'ouvrier place une petite bande de papier sur laquelle vient poser le bord de la glace à étamer et à laquelle, au préalable, on a fait subir un nettoyage et des lavages minutieux.

La glace maintenue horizontalement est passée dans la couche de mercure, en même temps qu'on fait pression à la face supérieure, afin d'éviter l'interposition de bulles d'air entre la glace et le métal. Cela fait, on maintient la glace appuyée sur la table au moyen de poids ; puis, inclinant légèrement la table, on laisse s'écouler le mercure non amalgamé. Cet égouttage dure de vingt-quatre à quarante-huit heures. Ensuite, on place la glace dans un égouttoir incliné et on l'y maintient jusqu'à ce que l'étain soit sec, ce qui demande de quinze jours à un mois suivant les dimensions de la glace.

Ce procédé d'étamage donne des miroirs de très belle qualité, mais il présente de tels inconvénients au point de vue hygiénique, par suite de l'influence pernicieuse des vapeurs de mercure sur la santé des ouvriers, qu'on a renoncé à peu près complètement à son emploi et qu'on l'a remplacé par l'argenture.

78. — Argenture. — On connaît la propriété que possèdent les sels d'argent d'être décomposés, sous l'influence d'un réducteur, avec dépôt d'argent métallique.

Le procédé dont nous allons donner la description repose sur la réduction du nitrate d'argent ammoniacal par l'acide tartrique. Ce procédé, dû à M. Petitjean et perfectionné par M. Brossette, est mis en application de la façon suivante :

Sur une table à double fond, en fonte, bien dressée et placée horizontalement, on dispose une toile vernie et sur cette toile une couverture de coton. La glace, après avoir été nettoyée et lavée, est placée sur cette couverture, puis recouverte de la solution argentique qui reste adhérente au verre par le seul fait de l'attraction moléculaire des bords de la glace.

Au moyen de serpentins de vapeur, placés dans le double fond de la table, on élève la température à 35° ou 40°. On voit alors, après sept ou huit minutes, se former çà et là des marbrures d'argent précipité, taches qui progressent très rapidement et se rejoignent sans solution de continuité en vingt-cinq à trente minutes.

On incline alors la table et on lave la glace à l'aide d'une peau de chamois imbibée d'eau distillée. Le liquide est recueilli dans une rigole qui borde l'appareil.

Replaçant la table dans sa position horizontale, on verse une deuxième liqueur d'argent qui, après un contact de quinze minutes, produit un second dépôt destiné à compléter et à renforcer le premier.

La glace est alors argentée ; on la place de champ dans l'atelier où on la maintient à une température de 25° à 28°.

Les liqueurs d'argent ont pour composition :

Liqueur n° 1		Liqueur n° 2	
Nitrate d'argent.........	10	Nitrate d'argent.......	20
Eau....................	50	Eau..................	1000
Ammoniaque...........	62	Acide tartrique........	2
		Eau..................	1000

On y ajoute :

Eau....................	30
Acide tartrique.........	1

La couche d'argent déposée sur les glaces est excessivement mince ; elle ne représente guère plus de 6 à 7 grammes d'argent par mètre carré.

L'étamage à l'argent présente plus de solidité et moins de dangers que l'étamage au mercure ; mais, par contre, le pouvoir réflecteur est beaucoup moindre, les objets blancs sont réfléchis avec une teinte jaune.

Ceci est dû à l'absorption d'une faible partie des rayons violets et bleus.

On sait en effet qu'on ne peut pas juger de la couleur d'un métal poli quand on le voit par réflexion, car les rayons qu'il réfléchit sont mélangés à une grande quantité de lumière blanche ; ils sont étendus, comme une solution colorée, dans beaucoup d'eau. Pour bien voir la couleur propre d'un métal, il est nécessaire que les rayons se réfléchissent plusieurs fois avant d'arriver à l'œil. Dans ces conditions, l'or paraît rouge, l'argent paraît vert.

Si on regarde à travers une glace argentée du côté où se trouve la couche d'argent, les objets paraissent violets ; c'est qu'en effet l'argent étant vert renvoie les rayons de cette couleur et ne laisse arriver à l'œil que les rayons

qui, par leur association, constituent la couleur complémentaire du vert, c'est-à-dire le violet.

On peut rendre plus solide l'argenture en formant après coup un amalgame, directement sur la glace argentée.

M. Lenoir a proposé d'employer, comme agent d'amalgamation, le cyanure double de potassium et de mercure. On en fait une solution très étendue, ne marquant pas plus de 1° à 2° à l'aréomètre Baumé. On verse cette solution sur le côté argenté de la glace et on lave aussitôt à l'eau distillée. On obtient ainsi un amalgame qui est plus solide et réfléchit mieux que l'argent seul.

Pour argenter les miroirs concaves, on a pendant longtemps fait usage de l'aldéhyde comme réducteur. Ce procédé, préconisé par Liébig, est maintenant abandonné.

M. Martin emploie une liqueur d'argent qu'il réduit avec du sucre interverti. Il opère à froid avec quatre solutions dont voici la composition :

I

Azotate d'argent....	40
Eau distillée	100

II

Ammoniaque à 24°..	70	centimètres cubes.
Eau distillée.......	1000	—

III

Potasse pure ..	40
Eau distillée...	1000

IV

Sucre interverti préparé avec :

Sucre	25
Acide nitrique......	3
Eau distillée........	250

en faisant bouillir pendant dix minutes et saturant incomplètement l'acide azotique par la potasse. On ajoute 50 centimètres cubes d'alcool et on complète le volume de 500 centimètres cubes. On a ainsi la liqueur n° 4.

Pour argenter l'intérieur d'un ballon, par exemple, on prend des volumes égaux de chacune des quatre liqueurs. On mélange la liqueur II à la liqueur I; on obtient un précipité qui se dissout quand toute la liqueur II est ajoutée. On verse alors la liqueur III, puis la liqueur IV. Cette dernière n'est ajoutée que quand le mélange des trois autres est déjà dans le ballon.

Le dépôt d'argent se produit immédiatement, mais n'est complet qu'après douze heures de contact. On lave ensuite à l'eau distillée.

L'argenture obtenue ainsi est tellement solide qu'on peut polir la couche d'argent avec du coton saupoudré de tripoli. Ce procédé était employé par Foucault pour déposer la couche d'argent à l'intérieur de ses miroirs. Par cette disposition les rayons lumineux, ne traversant pas le verre, ne subissent pas de déviation.

On protège généralement le dépôt d'argent, en le recouvrant d'une couche de vernis à dessiccation rapide, puis d'une couche de peinture au minium, ou d'une feuille de papier collée sur le vernis. Il arrive parfois que le vernis s'écaille et se soulève, mettant ainsi à découvert la couche d'argent. Comme ce métal est attaquable par les acides et noircit rapidement sous l'influence des évacuations sulfhydriques, il en résulte que, sous l'action du temps, les objets argentés prennent un aspect jaunâtre.

Dans le cas des glaces, cette action commence par les bords qui deviennent noirs. On atténue cet effet en recouvrant les tranches d'une couche de peinture.

79. — Platinage. — En raison des inconvénients que nous venons de signaler, on a cherché à remplacer l'argent par un métal moins sensible à l'action des agents chimiques. On a pensé au platine, dont la première application a été faite par M. Dodé vers 1865.

On fait usage de deux liqueurs :

I

Chlorure de platine	1 gramme
Essence de lavande	5 —

II

Chlorure de platine	1 gramme
Essence de lavande	12 à 15 grammes
Sous-acétate de bismuth impalpable.	2 grammes

On étale avec un pinceau, sur la glace à platiner, une couche de liqueur n° I, et après dessiccation on porte la glace dans un moufle chauffé au rouge sombre.

Cette première couche sert d'attache pour une seconde qui est faite avec la liqueur n° II. On cuit de nouveau, et après refroidissement on lave à l'eau distillée.

Le platinage est très solide, car le métal fait corps avec le verre qui a servi de fondant. En raison de cette solidité, on se dispense de protéger la couche de platine ; il est alors possible de placer la surface platinée du côté visible du miroir.

Cette manière de faire présente un avantage considérable en ce sens que, les images étant réfléchies directement par le platine, les rayons ne traversent pas le verre ; il devient, par suite, inutile de polir les deux faces de la glace. Il suffit que la face platinée soit parfaitement dressée.

Le platinage permet donc de faire usage de glaces travaillées d'un seul côté, ce qui permet de les couler à une

plus faible épaisseur et de réaliser, de ce chef, une économie considérable de matière et de main-d'œuvre.

D'autre part, la qualité du verre ne joue plus, comme dans l'étamage ou l'argenture, un rôle prépondérant. Malheureusement le platinage est bien inférieur comme aspect aux deux autres procédés; il est sombre et communique cette teinte aux objets réfléchis; aussi le commerce ne l'a-t-il pas adopté.

En outre, la nécessité de chauffer les glaces au rouge rend le platinage presque impraticable pour la fabrication de glaces de grandes dimensions, par suite des déformations qui se produisent pendant le passage au moufle.

Jusqu'aujourd'hui on n'a pu obtenir de glaces de grandeur supérieure à 120×66, et encore faut-il ajouter que celles qu'on a préparées à ces dimensions sont fort imparfaites.

La couche de platine déposée est excessivement mince et se laisse traverser par la lumière qu'elle colore en violet.

Outre son emploi pour les miroirs communs de petites dimensions, on a trouvé au platinage des usages divers. C'est ainsi qu'on emploie le verre platiné pour garnir les vitres de rez-de-chaussée en plaçant le côté platiné à l'intérieur. On est ainsi garanti des regards des passants, tout en se conservant la possibilité de voir les objets extérieurs. Du dehors, en effet, par suite de l'obscurité relative de l'intérieur, on ne voit que sa propre image réfléchie.

On a fabriqué avec le verre platiné des réflecteurs pour foyers électriques; dans cette application, le platinage se présente avec tous ses avantages, car il n'est pas altéré par l'action de la chaleur.

Une application intéressante du verre platiné est celle qui en a été faite pour la construction de rhéostats ou

résistances électriques pour courants de faible intensité.

80. — Dorure. — M. Schwarzenbach, de Berne, recouvre les glaces d'une couche d'or brillant ou mat pour en faire principalement des bordures, des cadres, etc.

Il fait usage de deux liqueurs : la première, qui est une dissolution de chlorure d'or dans l'eau distillée, alcalinisée ensuite par du carbonate de soude, contient 0 gr. 300 d'or métallique par litre.

La seconde est une dissolution saturée de protocarbure d'hydrogène dans l'alcool, étendue ensuite de son volume d'eau.

La dorure est obtenue en versant sur la glace un mélange de 200 centilitres de la première liqueur et 25 centilitres de la seconde. On laisse en contact pendant trois heures, et il ne reste plus ensuite qu'à laver et sécher.

81. — Examen des glaces. — *Détermination de l'épaisseur, de la planimétrie et du parallélisme des faces.* — Les qualités recherchées dans les glaces sont, outre leur pureté et leur limpidité, une épaisseur raisonnable (en rapport avec leur superficie) qui leur donne la solidité ; une parfaite planimétrie et un parallélisme absolu des faces, sans lesquels la glace ne peut constituer qu'un miroir imparfait.

Nous nous occuperons successivement de ces trois points dont le premier intéresse plus particulièrement le commerce, et les autres, le fabricant et l'opticien.

Épaisseur des glaces. — Sur une glace unie, on peut assez facilement s'assurer si l'épaisseur est suffisante pour que les conditions de sécurité et de garanties soient remplies d'un façon satisfaisante. Il n'en est plus de même

dans le cas où l'on veut se rendre compte de la valeur réelle d'une glace encadrée.

M. Benoît a imaginé un appareil auquel il a donné le nom de pachomètre, qui permet de déterminer de façon très exacte l'épaisseur de glaces étamées ou argentées.

La description de cet appareil nous entraînerait trop loin, aussi nous contenterons-nous d'en exposer le principe.

On sait que, lorsqu'un rayon lumineux vient frapper une surface réfléchissante, l'angle de réflexion est égal à l'angle d'incidence. Dans le cas d'une glace étamée, le rayon incident doit d'abord traverser la glace avant de rencontrer la surface réfléchissante.

Pour une incidence donnée, ce point de rencontre avec la face réfléchissante variera de position avec l'épaisseur de la face; il en résulte que le rayon réfléchi aura son point d'émergence à une distance variable, par rapport à la normale élevée au point où le rayon incident frappe la face non étamée de la glace.

On comprend qu'il existe entre ces éléments une relation d'après laquelle il est facile de calculer l'épaisseur de la glace.

L'emploi du pachomètre permet d'éviter tout calcul et donne directement et très rapidement le résultat cherché.

La détermination de l'épaisseur en divers points d'une glace de grandes dimensions est un moyen détourné de se rendre compte du parallélisme des faces; mais on reconnaîtra qu'il ne résout pas la question de la planimétrie.

Nous croyons intéressant d'indiquer ici par quels procédés on arrive à effectuer cette double détermination dans la fabrication des glaces destinées à l'optique.

S'il est vrai que l'exécution des instruments d'optique parfaits exige une précision exceptionnelle, où les inégalités doivent être souvent inférieures à $\frac{1}{1000}$ de millimètre ou 1 micron, les phénomènes lumineux présentent aussi des modes d'épreuve supérieurs à tous les procédés de la mécanique.

Les anneaux colorés, qui ont fourni à M. Fizeau une méthode admirable pour l'étude de la dilatation des corps solides permettent de constater, par un simple coup d'œil, si deux surfaces sont parallèles, et d'estimer les variations à moins d'un quarantième de micron.

De même, l'observation des images fournies par réflexion permet de vérifier le parallélisme de deux faces ou l'exactitude des angles dièdres qu'on a voulu leur donner.

M. Laurent, l'opticien habile bien connu, a coordonné toutes les méthodes de Foucault, y a ajouté beaucoup de procédés particuliers très ingénieux, et les a rendus applicables par la création d'appareils d'un emploi facile [1].

Appareil pour contrôler et exécuter les surfaces planes. — La figure 88 donne une vue perspective de l'appareil.

La figure 89 en représente une coupe verticale; la figure 90 est une vue de face dans laquelle la partie horizontale du faisceau est rabattue verticalement.

En O (*fig.* 89) se trouve un écran de papier blanc éclairé par le brûleur monochromatique; il envoie un cône de rayons qui se réfléchissent verticalement sur le miroir R, couvrent la surface de la lentille L, dont le foyer principal est en O′, et traversent le plan-type P ; une partie se réfléchit sur la face-type (indiquée en trait fort),

[1] On consultera avec intérêt un rapport fait par M. Mascart et publié dans le *Bulletin de la Société d'encouragement*, juin 1891.

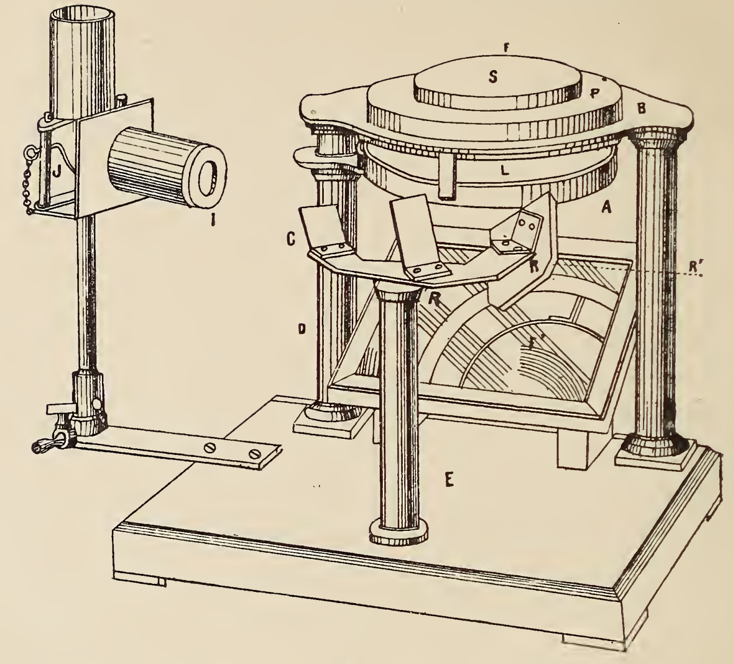


Fig. 88.

P, plan-type reposant sur le bâti B par l'intermédiaire de trois points. — La surface plane est en dessus, elle est d'une planimétrie parfaite.

S, surface à examiner, elle est posée sur P.

B, bâti fixé au socle E au moyen de deux colonnes fixes.

E, planche formant socle et portant diverses pièces.

D, douille mobile sur une des colonnes comme axe, elle porte un support annulaire A.

A, support dans lequel est posée la lentille L ; on peut le tourner de côté, afin de sortir la lentille pour l'essuyer.

I, lentille éclairante, plan convexe ; son foyer principal de 350 millimètres correspond au point O.

R, réflecteur ordinaire. Il a pour but, l'œil étant un peu au-dessus de O, de voir en *f'* les franges d'interférences produites en *f*, entre le plan-type et la surface à examiner.

r, petit réflecteur, permettant à une deuxième personne de voir les franges en même temps.

O, écran de papier blanc, éclairé en jaune par la lumière du brûleur J ; elle sert de surface éclairante pour produire les franges que l'on voit en regardant au-dessus de O.

C, deuxième surface éclairante pour les franges que l'on voit en regardant sur le côté en *r'* et perpendiculairement en regardant la direction du premier observateur. Cela est très utile dans le cas où deux personnes ont besoin de voir en même temps : un professeur et un élève, ou le patron et l'ouvrier.

f, franges d'interférences de M. Fizeau, produites entre la surface supérieure du plan-type et celle inférieure de la surface à examiner.

f, les mêmes, vues par réflexion, quand on regarde au-dessus de O. — J, brûleur monochromatique Laurent. — L, lentille servant à concentrer la lumière de J sur C et O. Cet appareil est à la fois un instrument de cabinet et un outil. — Marche de la lumière. — Elle est représentée par les schémas (*fig.* 89 *et* 90).

l'autre partie se réfléchit également sur la face de la pièce S (indiquée en trait fort). Ces deux systèmes de rayons interfèrent, produisent des franges colorées et reviennent en O″, près du point de départ où l'œil les reçoit.

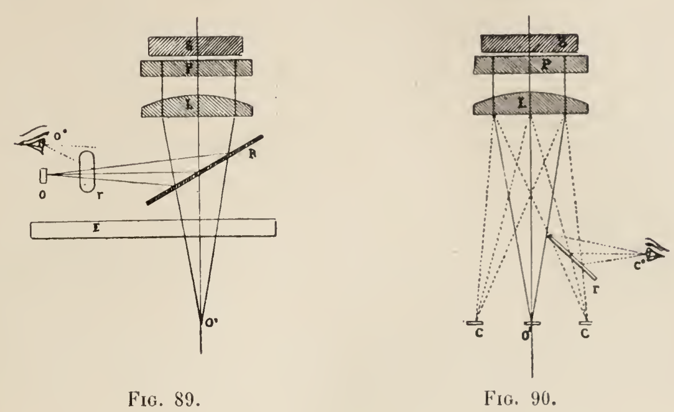


Fig. 89. Fig. 90.

On voit (*fig.* 90) un second écran C placé en dehors de l'axe; les rayons qu'il émet tendent à revenir en C″, mais un petit miroir *r* les renvoie sur les côtés en C′ où l'œil du deuxième observateur les reçoit (le premier étant en O′).

Vérification d'une surface. — Soit une surface plane S isolée, appartenant à une pièce optique quelconque. On la pose sur le plan type P. On allume le brûleur dont on dirige la flamme sur les écrans et l'on regarde en O″ (*fig.* 89). Si les surfaces sont bien essuyées, on voit des franges ou des anneaux noir gris sur un fond jaune clair. En appuyant légèrement sur S, on obtient à volonté des franges ou des anneaux. Ces deux apparences donnent, en se complétant, la forme exacte de la surface, à peu près comme les courbes de niveau indiquent le terrain sur une carte topographique.

Anneaux. — S'ils sont ronds, la surface est de révolution; en appuyant légèrement au centre, les anneaux changent de forme, ils s'agrandissent ou se rapetissent; dans le premier cas, la surface est convexe; dans le second, elle est concave.

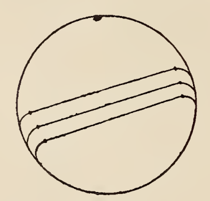


Fig. 91.
Franges produites par une surface plane.

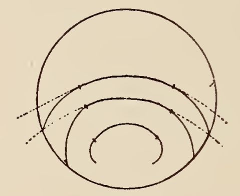


Fig. 92.
Franges produites par une surface convexe.



Fig. 93.
Franges produites par une surface concave.

Si les anneaux sont ovales, la surface est à double courbure. En mesurant le diamètre des anneaux, on pourra en déduire le rayon de courbure de la surface.

Franges. — Les franges droites et un peu espacées (*fig.* 91) indiquent un plan; les extrémités un peu recourbées dénotent des bords arrondis, ils le sont toujours. La figure 92 montre une surface convexe, la figure 93 indique une surface concave, mais dont les bords sont aussi rabattus.

Nous ne pouvons entrer ici dans tous les détails de fabrication; nous dirons seulement qu'en général on obtient l'apparence (*fig.* 92) plus ou moins exagérée, et qu'en voulant bien faire on peut tomber dans l'apparence (*fig.* 93).

Quand on veut faire des comparaisons exactes, il faut laisser la pièce et le plan-type un certain temps l'un sur l'autre, pour qu'ils soient bien à la même température : sans cela on peut avoir des différences de trois ou quatre anneaux.

Quand on travaille une surface isolément, on sait qu'elle est toujours arrondie sur les bords et plus ou moins pour des causes diverses ; elle est même plus arrondie qu'on ne le pense couramment.

Cette méthode est très pratique, car elle donne d'un coup d'œil la valeur de la surface ; il suffit de la poser sur le plan-type ; les franges indiquent si les bords sont rabattus, si le centre est creux, etc., ce qui importe enfin pour la conduite du travail.

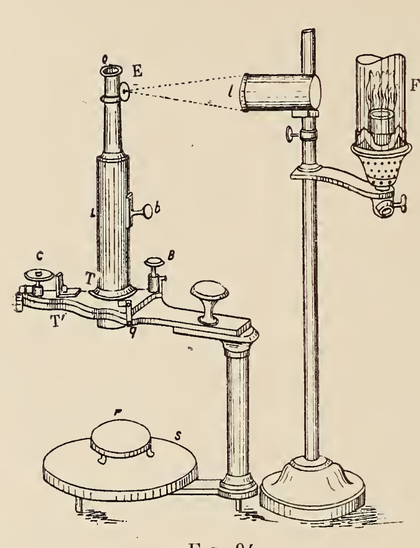
Pour obtenir de meilleures surfaces, on les agrandit au moyen de cales que l'on fixe de différentes manières ; tout l'arrondi se porte alors sur les cales et l'on obtient une très bonne surface centrale ; mais malheureusement, quand on décolle la pièce, elle change de forme, le verre étant beaucoup plus élastique qu'on ne le croit ordinairement.

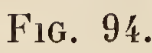
M. Laurent a obtenu cependant de très bons résultats en fixant au plâtre des plans ou des lentilles dans des anneaux en verre complets, l'espace occupé sur le plâtre ayant 1 millimètre de largeur. Avec ce procédé les franges sont droites jusqu'aux bords.

Appareil pour étudier le parallélisme des deux faces d'une glace. — Ces appareils (*fig.* 94) se composent de deux parties distinctes, un bâti servant de support aux pièces à examiner, et une ou deux lunettes auto-colimatrices de même forme.

Comme il est indispensable, pour la compréhension de ce qui va suivre, de connaître les détails de construction de la lunette autocolimatrice, nous la représentons (*fig.* 95, 96) et en donnons la description :

Marche de la lumière. — La lumière émanée d'un bec




Fig. 94.

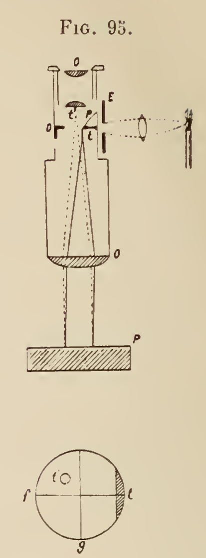


Fig. 95.

Fig. 96.

Légende explicative. — L, corps de lunette, vissée sur le trépied mobile T.

A, objectif achromatique ordinaire (invisible sur le dessin) de 240 millimètres de diamètre.

O, système oculaire représenté en détail (*fig.* 95).

E, écran sur lequel on projette la flamme du bec de gaz F.

l, lentille éclairante, sert à projeter en E la flamme F.

T, trépied mobile portant la lunette *l*, *t*.

T′, trépied fixe supportant le trépied T, au moyen des trois pointes *q*, B, C.

q, pointe fixe.

B, bouton servant à régler un des fils tangents à l'image pour amener celle-ci dans le milieu du champ.

C, tambour divisé servant à amener l'autre fil également tangent à l'image; c'est le fil de mesure, il donne l'inclinaison de la lunette *l*.

Les trois pointes sont retenues par trois ressorts antagonistes qui évitent le jeu.

S, socle sur lequel on pose les pièces optiques; il porte une colonne sur laquelle est fixé T′, au moyen d'un bouton.

P, surface plane réfléchissante.

b, petit bouton de serrage; il a pour but de fixer le courant de la lunette *l*, quand on a réglé la position des fils.

o, système oculaire positif, grossissant vingt fois.

D, diaphragme portant deux fils d'araignée, perpendiculaires; il est au foyer principal de l'objectif.

p, prisme éclaireur à réflexion totale, posé sur le trou *t*.

t, petit trou de 3/10 de millimètre de diamètre, percé dans le diaphragme D sur le côté et éclairé par *p*.

t′, image réfléchie du trou, invisible directement dans l'oculaire.

f, *g*, fils d'araignée en croix.

de gaz est concentrée en E ; elle est réfléchie par le prisme p de haut en bas, traverse le trou t qui devient l'objet éclairant, puis traverse l'objectif A dont le foyer principal est en D ; les rayons sortent en faisceau cylindrique, se réfléchissent perpendiculairement sur le plan P, traversent l'objectif de nouveau et viennent donner sur le diaphragme D une image du petit trou t. En inclinant soit le plan p, soit la lunette L, on amène le cercle éclairé à être tangent aux deux fils fg, ce qui détermine bien la position de la lunette : c'est le zéro. Si l'on dérange soit la lunette, soit le plan, d'un petit angle, l'image ne sera plus tangente aux deux fils, la distance à chacun d'eux donnera la position dans deux plans perpendiculaires ; il sera facile de trouver la position de la résultante, c'est-à-dire l'endroit où l'ouvrier doit appuyer.

Si l'on veut faire des mesures, on agira sur le bouton C (*fig.* 94) et on lira les divisions du cadran. Ce sont des nombres arbitraires, mais on peut déterminer pour chaque appareil la valeur de ces divisions en secondes.

Pour cela, on se procure un angle de 1° environ, soit au moyen de l'équerre à angle variable, soit autrement ; on mesure cet angle en minutes et en secondes au moyen du cercle divisé, puis on voit à combien de divisions du cadran C il correspond, et l'on en déduit la valeur d'une division en secondes.

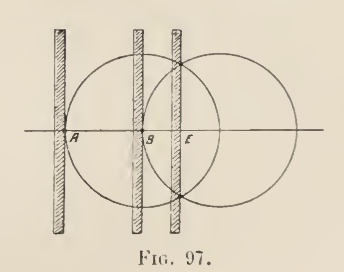


Fig. 97.

Cette valeur est très utile à connaître. On obtient le plus grand degré de précision possible, en rendant le bord de l'image tangent au fil qui sert à mesurer. On agit pour cela sur le tambour divisé C, on fait plusieurs

lectures et on prend la moyenne; on peut ainsi dire à quel degré de précison on donne la valeur d'un angle.

Pour avoir la valeur angulaire du diamètre de l'image, on cherchera une glace donnant deux images qui se coupent (*fig.* 97), on notera la valeur des écartements AB et AE et on aura : D = 2AE — AB.

Réglage des fils. — L'un des fils doit être parallèle au deux pointes q, B (*fig.* 94), et l'autre perpendiculaire. Si cette condition est remplie, la mesure est rendue plus commode; il suffit, en effet, que l'image soit dans le champ; on n'a alors à s'occuper que de sa position par rapport à un seul fil, celui de mesure et qui est parallèle à q, B.

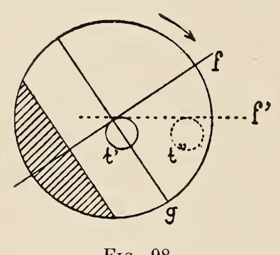


Fig. 98.

Soit (*fig.* 98) l'image t' qui doit suivre le fil f, par exemple, en tournant soit le bouton divisé, soit la pièce optique ; si cette image ne suit pas le fil et vient en t'', par exemple, il suffira de tourner tout entier le coulant de la lunette (*fig.* 94) (après avoir desserré le bouton b) de manière à rendre f' tangent à t''.

Pour l'exécution des surfaces parallèles de précision, on se sert d'une lunette dans laquelle q, C (*fig.* 94) est perpendiculaire à q, B, les deux boutons C et B sont divisés, cela permet de mesurer dans deux plans perpendiculaires sans déplacer la pièce; on obtient plus exactement la résultante et, quand on rend l'image tangente à l'un des fils, on ne dérange pas l'autre.

Dans quelques cas, on se sert d'un oculaire (*fig.* 99,100).

La lumière projetée en E se réfléchit sur la glace G, de haut en bas; on a l'image de fils sombres sur fond

éclairé, tandis que dans le premier oculaire on a l'image d'un trou éclairé sur fond sombre. Dans le deuxième cas, la lunette est réellement perpendiculaire au plan ; dans le premier cas, elle ne l'est pas, ce qui n'a d'ailleurs aucune influence sur la précision. Pour simplifier, nous continuerons à dire que la lunette est perpendiculaire au plan réfléchissant.

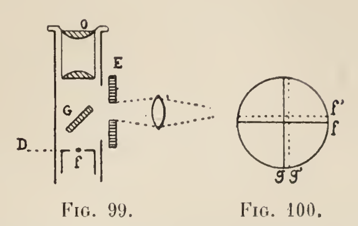


Fig. 99. Fig. 100.

O, système oculaire positif ordinaire d'un grossissement de 14.
G, glace éclairante à 45°.
D, diaphragme portant deux fils, *f* et *g*.
f, *g*, fils d'araignée perpendiculaires entre eux.
f' g', images des deux fils *f* et *g*.

En résumé, la lunette peut être considérée comme une normale à la surface à examiner, un plan peut être déterminé, comme direction, par sa normale : c'est l'inclinaison très amplifiée de cette dernière que l'on mesure. C'est ainsi que nous considérons les lunettes dans les appareils suivants.

Appareils pour le contrôle et l'exécution des surfaces parallèles. — Cet appareil est représenté en perspective (*fig.* 94).

Exécution de deux surfaces parallèles. — Soit à exécuter une deuxième surface, parallèle à une autre surface polie. M. Laurent emploie l'appareil représenté (*fig.* 94).

Cette surface étant préparée le mieux possible par les procédés ordinaires, on la pose sur trois pointes calées

sur le socle et l'on rend la lunette perpendiculaire à la face polie.

La figure 101 est un schéma théorique.

Nous supposons que la surface non polie Q n'est pas parallèle à la face polie P, elles font entre elles un angle α, c'est l'erreur. La lunette est réglée suivant ON perpendiculaire à P, elle fait donc avec la verticale OV un angle égal à α; on fait faire un demi-tour à la pièce, de manière que P vienne en P′, la normale à P′ sera ON′ faisant avec ON un angle 2α; N n'a pas bougé et son image viendra en N″ faisant alors avec ON un angle NON″ égal à 4α; l'erreur est donc quadruplée, ce qui rend le procédé très sensible. L'ouvrier voit où est le côté le plus épais, c'est-à-dire où il doit appuyer, c'est du côté où l'image est déviée.

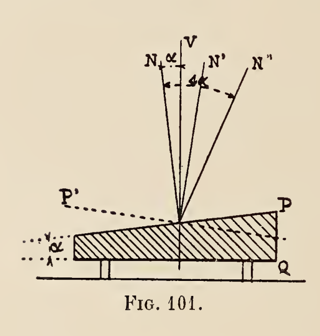


Fig. 101.

Remarque. — Si on estime l'erreur apparente en fonction de l'image, elle est bien 4α; mais, si on la mesure en rendant le fil tangent à l'image au moyen du cadran C (*fig.* 94) l'angle donné par les divisions sera seulement égal à 2α.

On peut tailler des tubes de verre à faces parallèles et les contrôler.

Vérification rapide des glaces parallèles

Glaces non argentées. — Si les deux faces PQ sont bien parallèles (*fig.* 102), les images du petit trou don-

nées par chaque face coïncideront et l'on ne verra qu'une image I. Si, au contraire, elles font un angle α (*fig.* 103), la face P donnera une image I, mais la face Q donnera son image en N″ faisant avec N un angle égal à 3α, exactement $2n\alpha$, n étant l'indice. Ici l'erreur est toujours égale à 3α, soit qu'on l'estime à l'oculaire en fonction de l'image, soit qu'on la mesure au moyen du cadran C. On a ainsi un procédé très pratique pour contrôler une glace parallèle, l'aspect des images indique d'un coup d'œil la qualité de la glace.

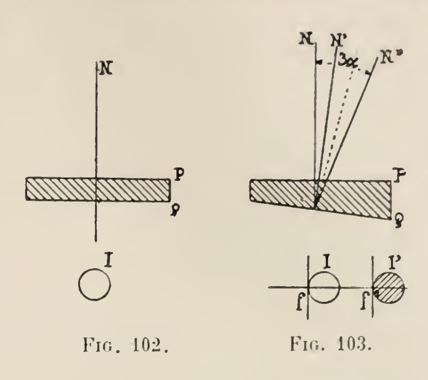


Fig. 102.

Fig. 103.

Si l'on n'a qu'une image et qu'elle soit nette, les deux faces sont parallèles et planes. S'il y a deux images, elles ne sont pas parallèles ; en amenant successivement les bords de chaque image I, I′ sous le même fil f, l'angle lu est triple de l'angle des faces. L'image fournie par Q est généralement moins éclairée (on peut l'affaiblir en passant un peu d'eau dessus avec le doigt), c'est de son côté qu'est le bord le plus épais. Si les deux images ne sont pas nettes, les faces sont courbes. Quand les bords sont arrondis, on le voit très bien, car les images changent d'écartement en ces endroits et deviennent aussi moins nettes. Dans les glaces du commerce, les deux images sont très écartées et varient beaucoup avec l'endroit examiné.

Glace argentée. — Une glace parallèle argentée ne donnera qu'une image très vive ; une glace non parallèle

(*fig.* 107) en donnera quatre ; la première, en commençant par le bord mince à gauche et perpendiculaire à la face, aura l'éclairement ordinaire comme dans le cas précédent ; la deuxième très vive, la troisième un peu plus pâle que la première et la quatrième peu visible. La distance angulaire entre les deux premières images est triple de l'angle des deux glaces ; la quatrième image n'est pas toujours bien visible, surtout quand les faces ne sont pas planes : dans ce cas en changeant le tirage de la lunette on la distingue mieux.

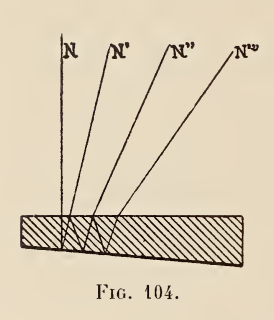


Fig. 104.

Au moyen du bouton C (*fig.* 94), on peut mesurer des lames prismatiques à angle faible pendant l'exécution ou après, etc. En résumé, on voit si les faces sont bonnes, si elles sont parallèles, si les bords sont arrondis.

Procédé pratique pour exécuter des glaces minces parallèles. — M. Laurent emploie un plateau en verre de 25 millimètres d'épaisseur et de 13 centimètres de diamètre (*fig.* 105). La face P est polie et porte une molette en liège M percée d'un trou *t* de 10 millimètres pour le passage de la lumière. L'autre face D, dépolie, est plane et parallèle à P. Elle est sillonnée de rigoles R, communiquant entre elles et avec le trou T. La glace à faire, G, est préparée à l'émeri le mieux possible ; le plateau étant retourné, on applique bien la glace sur D, on ajoute un poids, on colle les bords, soit à l'arcanson, soit au papier ;

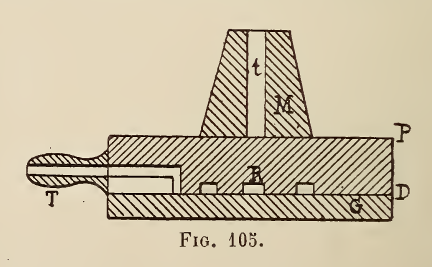


Fig. 105.

ce léger collage ne suffit pas du tout à retenir la glace, il sert seulement à empêcher l'air d'entrer dans les rainures R. On fait le vide en T, en aspirant avec la bouche par l'intermédiaire d'un tube en caoutchouc qui s'adapte en T au moyen d'une tige percée; quand le vide est fait et tout en aspirant, on appuie vivement la tige qui écrase la cire à mouler placée au fond de T et percée aussi; la cire en s'aplatissant bouche le trou; on retire alors la tige; c'est un moyen simple et rapide de faire le vide. La glace ne fait plus qu'un avec le plateau et on travaille le tout comme s'il s'agissait d'un seul bloc épais. Une fois polie, on retourne la glace, pour faire la deuxième face. Ce procédé donne d'assez bons résultats. On peut ensuite découper la glace en petits morceaux.

82. — Glaces soufflées. — Nous terminons ce qui a trait au verre à glaces en disant un mot de la fabrication des glaces soufflées.

On fabrique encore actuellement, suivant la méthode des Vénitiens, des glaces soufflées en Angleterre et en Bohême. Ces dernières sont connues sous le nom de miroirs de Nuremberg; quant aux produits anglais, ils sont dénommés: « patent plate glass. »

Par suite du mode de fabrication, on comprend que ces glaces ne peuvent être que de dimensions très restreintes; leur épaisseur est également très faible et ne dépasse guère 1 1/2 à 2 millimètres.

Dans le but de réduire le travail du doucissage, M. Chance, de Birmingham, a eu l'idée de placer chaque feuille de verre destinée à être doucie et polie sur du cuir mouillé reposant sur une table parfaitement plane. La feuille de verre adhère parfaitement au cuir et, sous

l'action de la pression atmosphérique, elle est maintenue dans une position bien plane.

Deux feuilles ayant ainsi été disposées. on les frotte l'une sur l'autre en interposant entre elles du sable et de l'eau, puis de l'émeri de plus en plus fin. Le polissage s'exécute de la même façon en employant de la potée.

Comme la feuille de verre n'a été maintenue horizontale que par l'action de la pression atmosphérique, elle reprend après le polissage, et en vertu de sa propre élasticité, sa forme primitive plus ou moins courbe, ce qui a peu d'importance, puisque les lignes de flot ont disparu et que les deux côtés ont un poli aussi parfait que la glace coulée.

§ 2. — **Verre mince coulé**

Dans ces derniers temps, l'emploi du verre pour le vitrage et la couverture des ateliers, gares de chemins de fer, marquises, abris, serres, etc., a pris une extension considérable.

On s'est d'abord servi de verre à vitres, simple ou double, mais on a dû renoncer ou, du moins, restreindre son emploi pour les usages extérieurs, par suite de la résistance insuffisante qu'il possède sous l'action des agents atmosphériques, vent, grêle, etc.

L'emploi des glaces eût été trop coûteux; on a alors pensé à fabriquer un produit intermédiaire ; et comme, en raison du poids, le soufflage était impraticable pour l'obtention de pièces de dimensions raisonnables, on eut l'idée de recourir au coulage.

83. — Fabrication. — M. J. Hartley, de Sunderland, a, le premier, mis cette idée en application.

En France, ces produits ont été pour la première fois livrés au commerce par la Compagnie de Saint-Gobain, sous le nom de verres à reliefs, à cause du dessin en creux existant sur les tables de coulage.

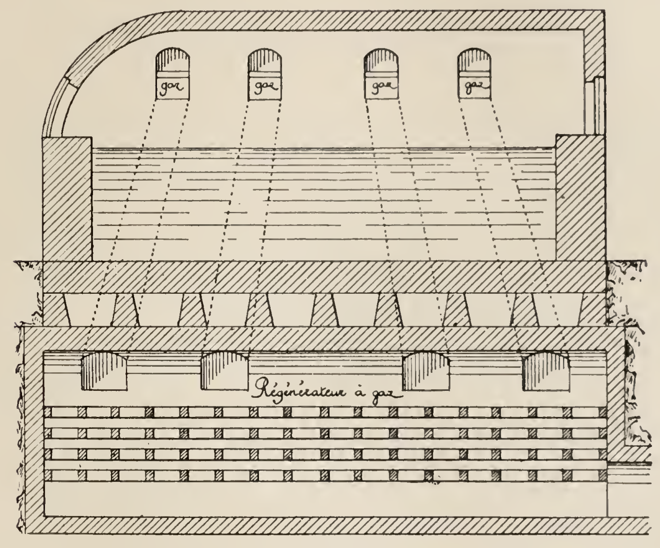


Fig. 106.

Comme il n'est pas nécessaire que le verre destiné à cette fabrication présente les qualités de pureté des glaces, on le produit généralement dans des fours continus, dits fours à bassin. Ces fours sont constitués par une cuve de grande longueur à parois réfractaires. Les matières sont enfournées à l'une des extrémités, où elles commencent à fondre ; le travail se continue vers le milieu du four et l'affinage ou purification s'opère vers l'extrémité opposée où le verre est cueilli à la poche.

La figure 106 donne une idée de la façon dont sont construits ces fours.

La poche (*fig.* 107) employée pour cueillir le verre n'est autre chose qu'une grande cuiller munie d'un long manche. Elle est en acier ou en cuivre ; elle peut contenir de 25 à 35 kilogrammes de verre.

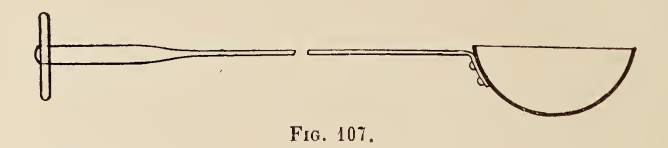


Fig. 107.

Une fois emplie, elle est amenée au-dessus de la table de coulage sur laquelle on la vide. On étend ensuite cette masse de verre à l'aide d'un rouleau reposant sur des tringles d'épaisseur égale à celle que devra avoir la feuille de verre. Les glaces laminées sont ensuite mises à recuire, soit dans un four continu, ou étenderie, soit dans des carcaises.

A la sortie de ce four, elles sont équarries aux dimensions demandées.

Comme nous venons de le dire, ces verres minces sont très rarement à deux faces unies ; le plus souvent l'une d'elles présente des dessins de forme variable : cannelures ou stries plus ou moins profondes, en lignes droites, ou en forme de carrés, de losanges, à côtés plus ou moins grands.

Le verre simplement cannelé s'applique spécialement à la toiture ; les verres à petites cannelures et à losanges s'emploient pour cloisons, portes, fenêtres, car ils sont moins transparents et présentent l'avantage de ne pas laisser pénétrer les regards dans les pièces qui en sont garnies.

L'épaisseur donnée à ce verre coulé varie de 4 à 6 millimètres ; le poids des feuilles est en moyenne de $12^{kg},500$ par mètre carré.

Au lieu de former le dessin sur la face inférieure de la feuille de verre, on peut opérer de la façon inverse, en employant une table unie et un rouleau gravé qui imprime les dessins qu'il porte sur la face supérieure de la feuille.

Cette manière de faire permet d'obtenir des dessins de forme variée, très déliés, donnant au verre un effet décoratif très satisfaisant. Ces verres sont fabriqués en France par la Compagnie de Saint-Gobain, qui s'en est assuré la fabrication et la vente en Belgique et en France.

Les verres à reliefs possèdent une résistance considérable à la flexion, ainsi qu'on pourra le voir dans le tableau ci-dessous donnant le résultat d'essais faits sur des verres de Saint-Gobain.

84. — Résistance des verres à reliefs de Saint-Gobain.

NATURE DU VERRE	ÉPAISSEUR MOYENNE des feuilles	POIDS MOYEN des BALLES DE PLOMB qui ont cassé les verres	Ces chiffres sont le résultat d'expériences faites sur 10 feuilles de chacune des espèces de verres, à l'aide de balles de plomb de divers poids qu'on a laissé tomber d'une hauteur de 18 mètres.
Verre double ordinaire......	3mm 1/2	8 grammes	
— — dépoli.........	3	2 —	
— triple dépoli..........	6	6 —	
Verre coulé de Saint-Gobain strié.......	5	16 —	
Verre coulé de Saint-Gobain losangé..................	5	16 —	

Le dépolissage fait perdre au verre une grande partie de sa force.

Les verres à reliefs de Saint-Gobain sont huit fois plus résistants que le verre double dépoli, et environ trois fois plus que le verre triple dépoli.

§ 3. — **Verre moulé**

85. — Boîtes et tuyaux en verre. — Les propriétés remarquables de plasticité, de malléabilité que possède le verre lorsqu'il est porté à une température élevée en ont fait une des matières susceptibles de se prêter le mieux au moulage. On peut obtenir en verre des objets aux formes les plus variées et présentant des avantages marqués sur les produits similaires en bois ou en fonte.

C'est ainsi qu'on fabrique en verre moulé des dalles, des tuiles, des pannes, qui permettent de répandre la lumière dans les ateliers, les sous-sols, qui jusqu'alors en étaient privés ; des boîtes ou cuves de toutes capacités, dont l'emploi dans l'industrie électrique remplace si avantageusement l'usage du bois ou de la gutta-percha ; des tuyaux de tous diamètres utilisés, en raison de leur étanchéité parfaite et de leur résistance aux acides, pour conduites d'eau ou de liquides corrosifs ; des briques ou tuiles creuses qui ont sur le vitrage simple l'avantage de mieux retenir la chaleur obscure, et qui, fabriquées en verre coloré en opale, sont employées avec succès pour la confection de revêtements à l'intérieur des habitations.

Comme on le voit, le verre trouve sa place partout ; aussi les applications déjà très nombreuses se multiplient-elles de jour en jour. On comprend d'ailleurs qu'il en soit ainsi, si l'on remarque que, de tous les matériaux connus, le verre est le seul qui réunisse les qualités de transparence et d'inaltérabilité sous l'action des agents chimiques et atmosphériques. Nous ne nous étendrons pas sur la fabrication des divers objets moulés, nous nous

contenterons de donner la description du mode de moulage généralement adopté.

Les pièces de forme régulière comme les dalles de sous-sol sont obtenues en versant du verre à la poche sur une table en fonte entourée d'un cadre en fer ayant l'épaisseur que doit avoir l'objet. On enlève l'excédent de verre en frisant glisser un rouleau qui s'appuie sur les bords du cadre. La pièce ainsi moulée est mise à recuire dans un four spécial. Si la dalle doit présenter des dessins sur l'une de ses faces, on exécute le moulage sur une table gravée d'après ce dessin.

Pour les objets de forme irrégulière et non plane, comme les tuiles, les pannes, on fait usage d'un moule en deux pièces, gravées ou taillées de façon que les reliefs correspondent aux creux que doit présenter l'objet.

Pour la fabrication de pièces de grande longueur ou profondeur et d'épaisseur relativement faible, telles que les tubes ou tuyaux, les procédés de mise en œuvre employés jusqu'ici sont complètement insuffisants ou beaucoup trop coûteux.

Si, en effet, on emploie le procédé du soufflage, le plus anciennement connu, il est possible d'obtenir des tubes ou cylindres de grandes dimensions, même en longueur, analogues à ceux que l'on doit produire pour la fabrication des feuilles de verres à vitres, mais leur prix en est toujours forcément élevé, les ouvriers capables de faire ces pièces étant peu nombreux et leur salaire étant toujours très élevé.

En employant de très bons ouvriers, il serait même difficile d'avoir une fabrication régulière et des tuyaux bien égaux de diamètre et d'épaisseur.

Le procédé du moulage employé ordinairement dans les verreries est insuffisant, car il ne permet de mouler

des pièces de dimensions un peu considérables qu'à la condition qu'elles soient de faible longueur ou de très forte épaisseur.

Il est donc inapplicable pour la confection des tuyaux de conduite dont la longueur, pour diminuer le nombre des joints et des frais qu'ils occasionnent, doit être aussi grande que possible.

A la suite de la demande d'ingénieurs pénétrés des avantages que présenterait le verre employé sous cette forme, M. Appert a été amené à chercher des conditions différentes de fabrication. Il a imaginé un procédé nouveau de moulage auquel il a donné le nom de « procédé de moulage méthodique », applicable à la confection de toutes espèces de pièces de grandes dimensions, ouvertes ou non des deux bouts, et en particulier à celle des tuyaux.

Le caractère distinctif de ce procédé est, à l'inverse de ce qui se passe dans le procédé de moulage communément usité, de conserver au verre pendant tout le temps du moulage la chaleur qu'il possède, en même temps que sa malléabilité, et de n'agir à tout moment que sur du verre dans les meilleures conditions de plasticité pour être façonné.

En voici la description (voir planche XIII) :

A une faible distance du four de fusion dans lequel se trouve le verre à l'état fondu et à la température voulue, on place à poste fixe un moule vertical percé à ses deux extrémités et pouvant s'ouvrir à charnières en deux ou trois parties.

Ce moule métallique, généralement en fonte et de grande épaisseur, est armé de fortes nervures destinées à en empêcher la déformation quand il est échauffé ; il a pour forme et pour dimensions intérieures la forme et

les dimensions extérieures du tuyau que l'on veut obtenir.

Il porte à la partie inférieure une rainure destinée à retenir le verre qui est venu s'y loger et s'y refroidir en en empêchant ainsi l'entraînement ultérieur.

La partie inférieure du moule est bouchée par un noyau conique de dimensions en rapport avec le diamètre intérieur du tuyau et la nature du verre employé ; ce noyau est destiné, au moyen d'une tige mue mécaniquement, à traverser le moule verticalement de part en part. Ce noyau repose, sans y être fixé, sur l'arbre qui doit le faire mouvoir ; il se centre au moyen d'un goujon saillant entrant dans une ouverture de même dimension.

Le diamètre de cette tige, que l'on doit faire aussi grand que possible, pour en éviter la flexion, est cependant plus faible de quelques millimètres que celui du noyau, de façon à ne pas toucher les parois du tuyau de verre, quand il vient d'être formé.

Cette tige est, de plus, guidée par des coussinets suffisamment écartés l'un de l'autre pour qu'elle se meuve exactement dans l'axe du moule.

Enfin, une bague ayant le diamètre du noyau, augmenté de 1 ou 2 millimètres, s'ajuste à la partie supérieure du moule et s'y fixe par un mouvement de baïonnette.

Le noyau ayant été mis en place et la partie inférieure du moule ayant été fermée, la partie supérieure étant grande ouverte, l'ouvrier cueilleur va, avec une poche ou cueillère portée sur un chariot, chercher le verre fondu et de fluidité voulue, dans le bassin ou dans le creuset, et vient le verser dans le moule en suffisante quantité ; un autre ouvrier ferme vivement la partie supérieure du moule et donne immédiatement au noyau un mouvement

d'ascension dont la vitesse doit varier avec la dimension des tuyaux et la nature du verre employé.

Le verre refoulé contre les parois du moule en prend toutes les empreintes et le tuyau se trouve formé derrière le noyau au fur et à mesure de sa montée.

Le verre qui a pu être mis en excès et qui a gardé toute sa fluidité, puisqu'il est resté en masse compacte et par suite non refroidie, est évacué en dehors du moule, figé sur le noyau même.

Il est séparé du tuyau par l'étirage qui se produit entre le noyau et la rondelle au moment de son passage à travers cette rondelle.

Une fois sorti du moule, le mouvement d'ascension se continue jusqu'à une hauteur de 25 centimètres environ, après quoi le noyau est pris par un verrou qui le sépare de la tige sur laquelle il était fixé et, en l'immobilisant, l'empêche de redescendre avec cette tige à laquelle on a imprimé un mouvement rapide de descente.

On enlève alors la bague mobile, avec le verre qui s'y est fixé, on ouvre le moule et on porte rapidement le tuyau terminé soit au four de recuisson, soit dans un bain de trempe de nature convenable porté à la température nécessaire.

La durée totale d'une opération, variable avec l'épaisseur des tuyaux et leur diamètre, est de quelques minutes, au bout desquelles on en recommence une nouvelle dans les mêmes conditions ; on a eu soin de mettre préalablement dans le moule un nouveau noyau froid, toutes les conditions de moulage restant ainsi les mêmes.

Une machine en marche normale doit pour cela posséder de six à huit noyaux. Dans ces conditions et pour des tuyaux de 100 millimètres de diamètre intérieur on peut faire de dix à quinze opérations à l'heure. Pour

éviter un trop grand échauffement qui pourrait entraîner des manqués ou des malfaçons, il est nécessaire d'avoir deux moules dans lesquels l'ouvrier couleur verse alternativement.

Les tuyaux ainsi obtenus sont ouverts des deux bouts, mais il arrive souvent que les extrémités sont trop épaisses ou inégales d'épaisseur; aussi, les tuyaux ayant été recuits, il est nécessaire de les couper sur une longueur de 10 à 15 centimètres. Cette opération peut se faire de diverses manières : soit en le coupant avec un diamant agissant à l'intérieur du tuyau, soit avec des roues en tôle arrosées de grès et d'eau agissant sur les tuyaux animés d'un mouvement de rotation lent. Les extrémités des tuyaux sont ensuite dressées à la platine et au grès, opération nécessaire pour en empêcher les fêlures et le filage ultérieurs. Les tuyaux ainsi obtenus ainsi que toutes les pièces moulées par ce procédé présentent cette particularité d'être absolument lisses et brillants à l'intérieur sans porter aucunement les traces du noyau qui les a produits. A l'extérieur, au contraire, ils ont pris tous les reliefs qui ont été donnés au moule.

Ces tuyaux sont d'une épaisseur sensiblement égale quand les dimensions du noyau et la vitesse d'ascension ont été calculées en raison de la nature du verre employé.

L'opération exige le concours de quatre ouvriers, qui ne sont que de simples manœuvres, et d'un apprenti, dont l'office consiste à immobiliser le noyau au bout de sa course et de le refroidir ensuite. Contrairement à ce qui se passe en employant le procédé du moulage ordinaire, l'effort mécanique nécessaire est extrêmement faible, ce moulage s'opérant pendant toute sa durée sur du verre très malléable. Le mouvement d'ascension peut

être produit par un moyen mécanique quelconque : vapeur, eau ou air sans pression.

Il est facile de se rendre compte qu'on peut par ce procédé mouler des pièces de verre et en particulier des tuyaux d'une dimension quelconque, et on pourrait dire illimitée; le procédé même est d'une application d'autant plus facile que les dimensions des pièces sont plus grandes. Il serait possible d'obtenir également des tuyaux munis d'un emboîtement, mais la facilité que cet emboîtement procurerait pour les jonctions serait compensée par les risques de casse et de fêlure au moment où on fait les joints ou quand ils se dilatent par suite des changements de température. Suivant l'usage auquel sont destinés les tuyaux fabriqués, on fait les joints de façons différentes :

Pour les tuyaux destinés à l'adduction des eaux sous pression, on emploie des joints métalliques permettant une dilatation facile et suppléant, par suite, à l'élasticité qui manque au verre. Beaucoup de personnes se sont préoccupées des chances de rupture que présenteraient ces tuyaux, soit dans leur maniement, soit quand ils sont une fois mis en place.

On peut parer aux chances d'accidents possibles, dont il ne faut pas toutefois s'exagérer l'importance, en les entourant d'une enveloppe protectrice faite de matériaux grossiers tels que ciments, béton, bitume ou d'un métal qui les garantisse complètement et facilite en même temps la confection des joints. On peut également par ce procédé confectionner des tuyaux cintrés en arc de cercle de rayon variable, au moyen de machines spéciales basées sur le même principe; ces tubes permettent d'embrasser des angles de 170° au maximum. Dans ce cas, le fonctionnement de l'appareil ne diffère de celui

employé pour les tuyaux droits qu'en ce que le noyau est fixe et que c'est le moule qui tourne autour d'un arbre faisant le centre de l'appareil.

Les premiers tuyaux qui ont été fabriqués avaient un diamètre intérieur de 10 centimètres et une épaisseur de 6 millimètres; ils pesaient de 5 kilogrammes et demi à 6 kilogrammes le mètre courant. La Compagnie de Saint-Gobain, seule concessionnaire du brevet Appert, a créé depuis divers types, dont les diamètres sont respectivement de 30, 35, 40 et 50 centimètres. La pression intérieure à laquelle ces tubes devront résister étant connue, on détermine l'épaisseur à leur donner en appliquant la formule de résistance des matériaux :

$$E = \frac{P_0 d_0}{2R}.$$

E, épaisseur;

d_0, diamètre intérieur ;

P_0, pression intérieure par centimètre carré;

R, résistance à la rupture variable avec la nature du verre et dont on pourra déduire la charge de sécurité en appliquant le coefficient de 0,25. Les tuyaux ainsi fabriqués peuvent subir sans rupture des variations brusques de température de 50° au moins, et ils peuvent rivaliser, au point de vue de la résistance et du prix, avec les tuyaux en grès employés communément.

Le verre ne sera pas inférieur non plus à la fonte au point de vue de la durée; bien composé, il ne s'altère pas, étant enfoui dans le sol pendant de longues années.

Au point de vue du prix, il sera notablement moins élevé que celui des tuyaux faits avec ce dernier métal.

Ce procédé permet d'employer le verre à la confection

de pièces longues, ouvertes ou non des deux bouts ; il permet en particulier de faire les boîtes rondes ou rectangulaires employées pour la confection des piles et des accumulateurs d'électricité, des vases pour la conservation des liquides facilement altérables.

Il pourrait être employé également pour la confection des tuyaux ou rigoles ouvertes destinés à loger les fils et câbles électriques et à les isoler. On devra écarter les appréhensions que ne manquera pas de susciter l'emploi du verre sous ces formes nouvelles et que justifie en apparence sa fragilité.

Tous les jours, en effet, on utilise le verre à des usages pour lesquels cette fragilité semblerait un obstacle à son emploi.

On peut en donner comme exemple : les dalles de verre coulé sur lesquelles le public circule sans crainte; les pavés placés dans les cours sur lesquels passent les voitures les plus fortement chargées ; les bouteilles à vins mousseux et à eaux gazeuses, véritables machines explosives dans lesquelles la pression s'élève souvent à 10 et 15 atmosphères et à côté desquelles on est habitué à vivre sans danger; les tubes indicateurs du niveau des chaudières à vapeur, les tubes pour les expériences de physique dans lesquels on emmagasine quelquefois des gaz allant à la pression de 100 atmosphères.

Le verre est, croyons-nous, appelé à rendre de notables services sous cette forme et, sans prétendre lui faire remplacer d'une façon complète la fonte et le grès, il pourra prendre à côté d'eux une place importante que justifient ses nombreuses qualités et le bas prix auquel il peut être obtenu.

Légende de la machine à mouler les tuyaux en verre (planche XIII)

A, vide permettant l'accès au bas du cylindre.
B, cylindre et piston à air comprimé donnant le mouvement à la tige C.
C, tige en fer creux portant à sa partie supérieure un cône D destiné à appliquer le verre chaud dans l'intérieur du moule E.
D, cône dont le diamètre extérieur est un peu inférieur au diamètre intérieur du tube à fabriquer.
E, moule en fonte en deux parties E_1 et E_2 disposées de manière à pouvoir se fermer à charnières d'une façon indépendante pour faciliter le versage du verre dans la partie inférieure E_1 et à s'ouvrir sur toute la hauteur d'une façon simultanée au moyen de la vis G pour permettre le démontage des tuyaux.
J, pièce mobile s'ajustant à baïonnette sur le moule une fois fermé et destinée à séparer par étirage le verre mis en excès, du tuyau qui vient d'être moulé.
K, verrou destiné à isoler le cône mouleur D avant de faire redescendre la tige C qui a servi à son ascension.

En terminant ce qui a trait au verre moulé, nous parlerons de quelques applications récentes qui en ont été faites.

Poulies en verre. — On a obtenu d'excellents résultats de l'emploi de poulies en verre. La jante seule est en verre, et la partie intérieure est occupée par un rayonnage en fer qui supporte le moyeu également en fer.

D'après les expériences déjà faites, il a été prouvé que ces poulies résistaient à toutes les pressions. Elles réduisent la friction à son minimum et peuvent durer un temps indéfini. Elles résistent parfaitement aux chocs.

Leur fabrication doit être soignée de façon toute spéciale; on les coule en verre extra-dur et on leur fait subir une recuisson prolongée, qui dure généralement soixante-douze heures.

86. — Cuves à vins. — Depuis plusieurs années on emploie le verre avec succès pour garnir les parois

des réservoirs dans lesquels est conservé le vin, soit au moment de la fabrication, soit au moment d'être vendu.

On découpe pour cela dans des glaces brutes d'une épaisseur de 11 à 12 millimètres, des carreaux de dimensions appropriées aux parois qu'on a à recouvrir. On noie ces carreaux dans un bain de mortier de ciment Portland à prise demi-lente, posé comme enduit le long des parois en maçonnerie, en ayant soin que les bulles d'air qui pourraient être emprisonnées entre le mortier et le verre soient expulsées complètement.

Les revêtements en verre sont d'un nettoyage facile, et l'on sait qu'il n'en est pas de même des cuves garnies simplement de ciment et même des foudres en bois qu'il est difficile de nettoyer d'une façon irréprochable, les surfaces rugueuses ou poreuses du ciment retenant, quelles que soient les précautions prises, des organismes susceptibles d'amener des fermentations accessoires.

On évite ainsi de laisser prendre au vin le goût de terre ou de pierre qu'occasionne souvent l'emploi du ciment ou des carreaux vernis.

87. — Maisons en verre. — Les progrès réalisés dans la seconde moitié de ce siècle, en permettant de fabriquer le verre et de le fournir économiquement sous les formes les plus diverses et sous des dimensions très considérables, ont rendu possible son application à la fabrication de pièces de construction auxquelles il eût été impossible de penser auparavant.

Nous voulons parler en particulier des planchers et des toitures, où, employé en épaisseur suffisante et de forme convenable, le verre permet à la lumière de s'introduire dans les profondeurs les plus reculées et jusqu'ici le plus souvent inaccessibles.

Il est maintenant possible de construire en verre des maisons d'habitation.

Pour la construction des murs, on emploie le verre soit en masses compactes, soit en pièces soufflées de formes telles que leur assemblage soit facile.

Dans une carcasse en fers d'angle, réunis entre eux par des bandes de fer plein, on dispose des briques en verre verticalement, de façon à constituer une double paroi dans l'intérieur de laquelle on peut faire circuler, l'hiver, de l'air chaud, l'été de l'air, comprimé qui en se détendant provoque le refroidissement.

Dans ces parois sont également logés les fils électriques et téléphoniques.

Par l'emploi de ces matériaux en verre, on obtient des surfaces lisses et inaltérables, d'un nettoyage facile, en même temps qu'un isolement parfait qui place les habitants à l'abri des variations de température de l'air extérieur.

Dans cette même maison de verre, on établirait également en verre des canalisations de toutes espèces, utilisées soit pour l'adduction de l'eau dans les meilleures conditions d'hygiène et de salubrité, soit pour l'évacuation des liquides résiduaires de toute nature. En outre, là où il sera jugé nécessaire, les fenêtres seront garnies des vitres perforées dont nous avons parlé plus haut.

Il est surperflu d'insister sur les avantages que présente une construction ainsi comprise : impuretés des parois rendues visibles, lavages d'une exécution facile, partout l'air et la lumière. Telles sont les conditions que, seul, l'emploi du verre permet de réaliser et qui établissent bien nettement le rôle que peut et doit jouer le verre, qui devient ainsi le coopérateur, l'agent indispensable de l'hygiène.

Une application du genre de celle dont nous venons de parler a été faite récemment par M. le Dr Van der Heyden, médecin hollandais, établi depuis plusieurs années au Japon, qui a eu l'idée de construire une maison à température constante.

Il a pensé à utiliser la propriété que possèdent les solutions salines de laisser passer les rayons lumineux à l'exclusion des rayons calorifiques émanant d'une source lumineuse quelconque.

Pour cela faire, il divise les murailles en panneaux métalliques dans lesquels on enchâsse de doubles plaques de verre de façon à former des caissons étanches qu'on remplit de la solution saline convenable, à la manière dont l'eau est introduite dans un aquarium.

Des cheminées d'aérage convenablement disposées servent à la ventilation d'hiver et à celle d'été.

Cette application est intéressante, car on comprend que de semblables constructions pourraient rendre de grands services dans les pays chauds où une différence de quelques degrés dans la température des habitations serait très utile et très favorablement appréciée.

On n'a aucun renseignement sur le nombre des applications qui ont pu être faites.

88. — Rideaux en verre. — L'emploi du verre pour la construction des maisons d'habitation a amené tout naturellement l'idée de faire servir la même matière à la fabrication de divers objets d'usage domestique.

C'est ainsi qu'on a utilisé le verre pour la décoration des appartements en faisant des rideaux destinés à remplacer les rideaux d'étoffe ou de mousseline qu'on pose devant les fenêtres pour les garantir des regards des voisins.

Ces rideaux faits avec de petits carreaux de verre uni ou agrémenté de dessins, blanc ou de couleur, ont plus de transparence que les rideaux d'étoffe et peuvent donner, en employant des couleurs judicieusement choisies, des effets analogues à ceux des vitraux ordinaires mis en plomb.

Les morceaux de verre qui les composent sont encadrés chacun dans du zinc et reliés entre eux par leurs angles au moyen de petites agrafes en forme de crochets en S, ce qui leur donne une souplesse permettant de les relever, de les plier et en même temps de les allonger ou de les raccourcir dans les cas de déplacements.

Ces rideaux sont généralement placés dans les antichambres, les salles à manger, les vérandahs, etc.

89. — Tables en verre, guéridons, dessous de plats, dessous de lampes, etc. — On fabrique maintenant des pièces moulées de toutes dimensions, pour tables, guéridons, dessous de plats, encriers, etc.. qui, grâce à la propriété que possède le verre de donner au moulage des dessins fins et variés, constituent des pièces très décoratives et à très bas prix. On peut d'ailleurs, grâce à la transparence du verre, en rehausser l'éclat par la dorure ou l'argenture.

La Compagnie de Saint-Gobain fabrique dans ce genre des pièces moulées qui sont irréprochables à tous les points de vue. Sous ce rapport, il y a là un grand progrès dont bénéficiera l'art de l'ingénieur et de l'architecte en ce qui concerne l'extension des emplois du verre dans les constructions.

90. — Verre grillagé. — La Compagnie de Saint-Gobain s'est assuré en France la fabrication d'un verre spé-

cial dit verre grillagé, qu'on obtient par l'insertion d'un réseau métallique dans l'épaisseur d'une feuille de verre.

Il est inutile d'insister ici sur l'importance qu'est appelé à prendre ce verre dans la construction. L'incorporation du réseau métallique est destinée à supprimer tout danger pouvant résulter de la rupture du verre, en assurant une liaison qui subsiste après rupture entre toutes les parties de la feuille de verre. Dans les grandes constructions : ateliers, halles, gares de chemins de fer, on a toujours à ménager d'immenses verrières dont les vitres sont exposées à de multiples chances de bris. Jusqu'aujourd'hui ces verrières étaient construites en feuilles épaisses de verre coulé, ce qui augmentait, il est vrai, leur résistance, mais donnait en même temps plus de gravité aux accidents.

On a quelquefois recours à des toiles métalliques disposées en-dessous des verrières ; mais, outre que les frais de pose se trouvent être notablement augmentés, il faut bien reconnaître que, par suite des altérations auxquelles ces toiles métalliques sont exposées, leur efficacité ne peut avoir qu'une faible durée.

Avec la toile noyée dans le verre cet inconvénient n'existe plus, car elle se conserve intacte, et est toujours en mesure de jouer efficacement un rôle protecteur.

Les essais qui ont été tentés, en 1886, par MM. Bécoulet et Bellet, en 1892, par M. Schumann, et, antérieurement par un grand nombre d'inventeurs ne donnent satisfaction que d'une façon incomplète les uns et les autres. En effet, MM. Bécoulet et Bellet, en plaçant leur treillis métallique entre deux feuilles de verre coulées non simultanément, réalisent un produit qui ne possède aucune homogénéité ni cohésion.

D'autre part, M. Schumann ne peut avec son procédé

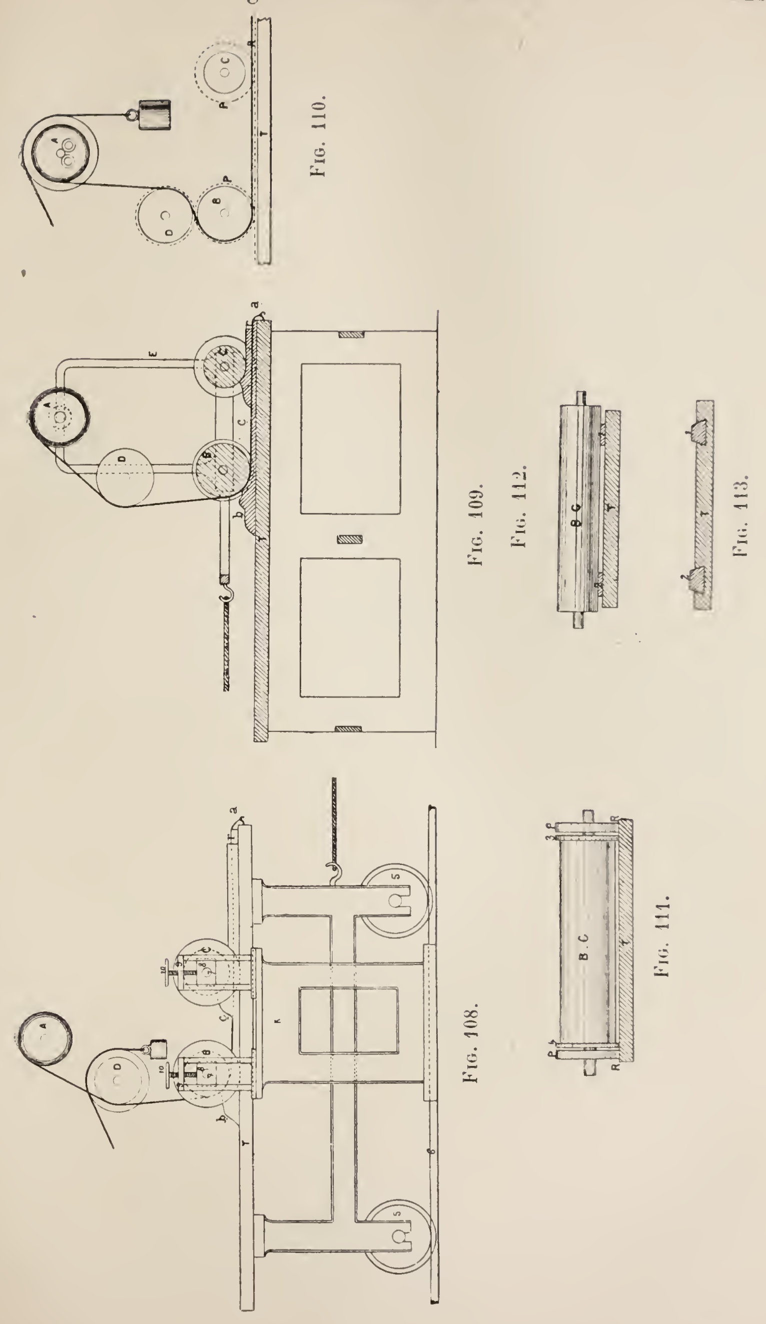


Fig. 110.

Fig. 109.

Fig. 112.

Fig. 113.

Fig. 108.

Fig. 111.

faire usage de treillis métalliques légers, qu'il est cependant préférable d'adopter pour obtenir les qualités essentielles de transparence et de limpidité. Pour satisfaire aux diverses conditions qu'exige la fabrication de ce genre de verre, le procédé à mettre en œuvre doit :

1° Permettre d'introduire le réseau métallique dans la pâte du verre d'une façon complète et régulière et à la distance des surfaces de la feuille fabriquée qu'on fixera à l'avance ;

2° Rendre possible l'emploi de réseaux à fils aussi ténus et aussi écartés que possible, juste suffisants pour répondre aux conditions de sécurité demandées, tout en évitant de diminuer la transparence du verre et de nuire à sa solidité.

Le nouveau procédé imaginé par M. Appert est caractérisé par la superposition de deux feuilles de verre parfaitement soudées et amalgamées ensemble au moment même de leur laminage et entre lesquelles le réseau métallique convenablement préparé a été introduit simultanément au coulage des deux couches de verre.

C'est cette simultanéité du coulage et de l'interposition du réseau métallique qui différencie le procédé Appert de celui de MM. Bécoulet et Bellet et le rend de beaucoup supérieur à ce dernier, lequel n'a jamais permis d'obtenir un produit industriel, parce que la seconde couche de verre ne se soudait jamais que très imparfaitement à la première.

Deux dispositifs de machines peuvent être adoptés pour la mise en œuvre du procédé Appert : ou bien l'appareil lamineur est fixe et la table mobile, ou bien l'appareil lamineur se déplace au dessus.

Dans l'un et l'autre cas, le réseau métallique préparé de longueur et largeur égales ou mieux inférieures à

celles de la feuille de verre à fabriquer est fixé sur un rouleau A placé au-dessus des appareils de laminage et représenté aux figures 108 à 113, qui donnent une vue schématique des deux dispositifs de machines. Une des extrémités du réseau métallique est attachée provisoirement, et pour la durée du temps du laminage, à l'extrémité de la table de coulage T. Ce réseau est soutenu à la hauteur convenable par une règle *r* qui le maintient à une distance voulue de la table, égale à l'épaisseur de la première couche de verre.

Entre ce rouleau A et le point d'attache *a* le réseau métallique vient s'appliquer sur un deuxième rouleau B, qui est porté sur la table en fonte par l'intermédiaire de deux règles en acier 1, 2, ou bien sur deux rondelles 3, 4 formant frettes à ses deux extrémités. Les règles ou les rondelles sont d'épaisseur égale à l'épaisseur que devra posséder la deuxième couche de verre. Enfin, derrière ce rouleau B, parallèlement à lui et pouvant se déplacer dans le même sens, un troisième rouleau *c* qui s'appuie sur la table par l'intermédiaire de deux règles ou de deux frettes ayant l'épaisseur définitive que la feuille doit avoir une fois terminée.

La distance qui sépare le rouleau B du rouleau C doit pouvoir varier, suivant la nature du verre employé et l'épaisseur de la feuille à fabriquer. Elle doit être telle que le versage d'une poche remplie de verre ou d'un creuset puisse être effectué sans difficulté. Une fois bien arrêtée, cette distance doit rester invariable pendant le cours de la fabrication.

Voici comment fonctionne l'appareil, suivant que la table est mobile et les rouleaux fixes, ou que la table est fixe et les rouleaux mobiles.

Premier cas. — La table est mobile.

Dans ce cas, la table est portée sur des galets 5 roulant sur des rails 6 convenablement écartés; les rouleaux B et C sont traversés par des arbres 7 dont les fusées tournent dans des coussinets 8 glissant eux-mêmes dans des cages en fonte 9 portées sur un bâti K fixé dans le sol; des ressorts ou vis 10 agissant sur les coussinets permettent aux rouleaux d'exercer la pression voulue sur le verre au moment du laminage. La cage portant les coussinets du rouleau C peut être éloignée ou rapprochée à volonté de la cage du rouleau B; de plus, deux pignons P montés sur les arbres engrènent avec deux crémaillères R placées longitudinalement à la table de façon à être entraînés par elle au moment de sa translation.

Enfin, un quatrième rouleau D ayant la même vitesse que le rouleau B est placé au-dessus de lui, il est destiné à entraîner le réseau métallique et en même temps à l'étendre transversalement.

Pour obtenir ce résultat, la surface de ce rouleau présente la forme d'un rouleau de carde, c'est-à-dire qu'elle est garnie de saillies dans lesquelles les fils peuvent se prendre momentanément; de plus, le rouleau étant en forme de tonneau, le réseau tend continuellement à s'écarter et à s'élargir. Pour maintenir la tension du réseau métallique, il est bon de munir le rouleau A, sur lequel il est enroulé, d'un système de frein quelconque permettant d'éviter son entraînement, ou de le régler à volonté, ainsi qu'il est représenté schématiquement à la figure 6.

On procède à la fabrication d'une feuille de verre grillagé de la façon suivante :

Le réseau métallique ayant été attaché à la table par des fils aussi fins que possible, on coule le verre de la

manière ordinaire au moyen d'une poche ou d'un creuset qui déverse le verre sur la table T, en *b* devant le rouleau B, puis on donne le mouvement à la table. Le réseau actionné tangentiellement au rouleau B se soude avec le verre qui se lamine en même temps sous ce rouleau, tout en restant à la surface de la feuille de verre; puis, dès que l'opération est commencée, on verse une nouvelle quantité de verre fondu en *c* derrière le rouleau B et en avant du rouleau *c*. Cette nouvelle masse de verre se lamine à son tour sur l'autre et, en se soudant avec elle, forme la feuille de verre qui est ainsi terminée à ses dimensions définitives.

Deuxième cas. — La table est fixe et les rouleaux sont mobiles.

On verse comme précédemment le verre fondu en *b* devant le rouleau B, et on met en mouvement le bâti portant le rouleau B et C; aussitôt après, on verse une nouvelle quantité de verre en *c* devant le rouleau C, qui se trouve être laminée et soudée comme il a été dit plus haut. Le laminage étant terminé, on coupe vivement avec des ciseaux les fils métalliques qui tiennent le réseau attaché à la table et on laisse la feuille de verre dans un four à recuire où il est procédé à son réchauffage et à sa recuisson comme d'habitude.

L'opération étant terminée, on procède à une deuxième; pour cela on remplace le rouleau A qui est fou sur ses axes par un autre sur lequel un réseau a été enroulé au préalable, on l'attache à la table au point *a* et on le tend.

On voit que, par l'un ou l'autre des procédés que nous venons de décrire, rien ne s'oppose à ce qu'on obtienne des feuilles de verre de dimensions analogues à celles des feuilles ordinaires fabriquées par laminage.

Ce procédé de fabrication du verre avec réseau métallique intérieur est des plus simples et ne peut amener qu'une augmentation très faible du prix de revient, augmentation largement compensée, d'ailleurs, par les avantages que le verre grillagé présente sur le verre ordinaire.

CHAPITRE V

VERRE DE BOHÊME. — CRISTAL VERRE D'OPTIQUE. — PHARES

§ 1. — Verre de Bohême

91. — Historique et fabrication. — La fabrication du verre en Bohême remonte au XIVe siècle, mais elle n'a acquis de renommée qu'au commencement du XVIe siècle, époque vers laquelle le Vénitien Nicolo, surnommé Waloch, établit dans un faubourg de Vienne une verrerie travaillant à la manière de Venise.

Actuellement, on rencontre encore en Bohême de petites verreries, mobiles en quelque sorte, que l'on déplace au fur et à mesure de l'exploitation des forêts. Ces verreries ne fabriquent que du verre brut qui est livré aux raffineurs.

Ces derniers ont des établissements fixes dans lesquels, outre la verrerie proprement dite, sont installés des ateliers pour la taille et la décoration du verre.

Le combustible généralement employé en Bohême est le bois qui est amené aux usines fixes par trains flottants. Cependant les plus importantes de ces usines ont

maintenant des fours à gaz alimentés par de la tourbe ou des déchets de bois.

Bien que le verre de Bohême ne contienne pas trace de plomb, sa pureté et sa blancheur, dues aux soins apportés par les fabricants dans le choix des matières premières, le rendent comparable au cristal, nom sous lequel il est d'ailleurs fréquemment désigné dans le commerce.

Les verres de Bohême ont pour caractère particulier de jaunir légèrement par leur exposition à la lumière ; aussi les marchands les conservent-ils généralement bien enveloppés et souvent même dans l'obscurité.

Le verre de Bohême est un silicate de potasse et de chaux.

La silice provient de quartz très pur réduit en poudre fine après avoir été calciné et étonné par immersion brusque dans l'eau froide.

La chaux est employée à l'état hydraté.

Voici la formule généralement usitée pour les compositions :

Quartz....................	100
Chaux hydratée	17
Carbonate de potasse.......	32
Bioxyde de manganèse	1
Acide arsénieux	3,30 à 5,50
Groisil ou déchets de verre..	30 à 50

Les Bohêmes travaillent le verre avec une grande habileté et savent particulièrement bien utiliser le contenu de leurs creusets.

Leur outillage est des plus simples : plusieurs cannes creuses et quelques tiges pleines en fer, une auge contenant de l'eau pour refroidir le verre, auge à l'une des parois de laquelle est fixée une fourche qui servira de support à la canne ; une plaque de fonte pour parer, « mar-

brer » le verre; une palette en bois dont une surface est concave, des ciseaux à longues branches, des pinces et des moules en bois (poirier ou hêtre), en métal ou en terre.

Voici comment s'exécute la fabrication d'une chope: Après avoir cueilli et paré la masse de verre nécessaire à la confection de l'objet, le souffleur en forme une boule épaisse qu'il arrondit, puis allonge avec la palette en bois mouillée au préalable. Il réchauffe ensuite la pièce et l'introduit dans le moule à deux compartiments, que l'aide referme aussitôt, puis il souffle fortement.

Quand on fait usage de moules en terre, qui s'usent beaucoup moins rapidement que ceux en bois, on les garnit à l'intérieur de résine en poudre, qui, par son inflammation produit des gaz qui neutralisent l'effet que produiraient les petites aspérités du moule.

A sa sortie du moule, la pièce a la forme d'une carafe, on la sépare de la canne et on enlève la calotte qui reliait le corps du verre à la canne en le tournant pendant quelques instants sur une barre de fer rougie, puis en touchant avec le doigt mouillé un des points chauffés. Il se produit alors une fente circulaire qui amène la chute de la calotte supérieure.

La chope est alors recuite, puis on use les bords à la roue du tailleur. Cette manière de faire présente sur celle qui consiste à rebrûler les bords, à les refondre, pour enlever la rugosité, l'avantage d'éviter l'empontillage des pièces.

On réalise ainsi une économie de matière fondue tellement considérable qu'on assure que les trois quarts de la matière contenue dans les creusets est réellement utilisée, tandis que par les autres procédés on n'en peut utiliser que la moitié.

Il faut remarquer toutefois que les bords des verres

de Bohême sont moins solides que ceux qui sont arrondis au feu.

Le verre de Bohême, par sa blancheur et son éclat, se prête merveilleusement à la décoration. On connaît l'habileté des artistes qui, en Bohême, s'adonnent à la taille et à la décoration de ces beaux produits de luxe répandus dans le monde entier ; ils excellent particulièrement dans l'ornementation par les couleurs de moufle, leur dorure est fort belle et on ne peut qu'admirer les jolis effets de leur argenture mate, brunie et à reliefs.

Il existe en Bohême un certain nombre de verreries qui produisent un verre à base de plomb, blanc ou de couleur, pour l'imitation des gemmes naturelles.

D'autres, plus nombreuses, s'occupent spécialement de la fabrication des perles en verre ou d'objets de lustrerie.

Les ouvriers qui travaillent à la taille de ces objets sont disséminés dans les vallées de Wisenthal, d'Oberwisenthal, et sont logés dans de petites habitations servant d'atelier à toute une famille. Des enfants de cinq à six ans sont occupés à ce travail d'usure et de polissage qui ne demande d'ailleurs que peu de force.

Pour la fabrication des verres colorés, on remplace généralement une partie de la potasse par la quantité équivalente de soude.

La composition suivante est employée à la verrerie de Cracowa :

Quartz....................	120
Carbonate de potasse.......	30
Carbonate de soude	12
Chaux....................	12

La matière colorante est ajoutée soit directement à

cette composition, soit pendant la fusion. Ce sont des oxydes métalliques qui fournissent la coloration; mais on a reconnu qu'il était préférable de les faire entrer à l'état d'azotates plutôt qu'à l'état d'oxydes précipités. Ils se répartissent mieux et plus uniformément dans la masse.

§ 2. — Cristal

92. — Historique. — Il est certain que, depuis très longtemps, on a fabriqué un verre contenant du plomb.

Le moine Théophile en parle dans son deuxième livre : *De l'Essai sur divers arts;* il en est également question dans le traité de *l'Art de la verrerie*, par Néri, Merret et Kunkel ; mais, d'après ces documents mêmes, on peut conclure que le verre plombeux des anciens se rapprochait beaucoup du strass, il contenait plus de plomb que le cristal actuel.

C'est aux Anglais que revient l'honneur d'avoir créé ce produit : flint-glass ou cristal, qui constitue la plus belle matière vitreuse qu'on connaisse jusqu'à ce jour. Sa découverte est la conséquence de l'emploi de la houille dans la fabrication du verre. On remarqua, en effet, que l'emploi de ce combustible donnait un verre plus coloré que le verre fondu au bois; pour obvier à cet inconvénient, et afin de protéger le verre contre l'action de la fumée du charbon, on fit usage de pots couverts, en forme de cornues à col très court.

Cette manière de faire eut pour résultat de rendre la fusion beaucoup plus lente, ce à quoi on porta remède en augmentant la proportion d'alcalis. Nouveau déboire :

le verre obtenu était de qualité inférieure et encore coloré.

On eut alors l'idée de remplacer une partie de l'alcali par un autre corps très fusible, l'oxyde de plomb.

Après de nombreux tâtonnements dans la recherche des proportions convenables, on en arriva enfin au flint-glass.

Le cristal fut fabriqué pour la première fois, en France, par Lambert, à la verrerie de Saint-Cloud; on opérait suivant la méthode usitée en Angleterre.

En 1787, il se monta à Saint-Louis une cristallerie travaillant dans des pots couverts chauffés au bois. Enfin, en 1815, fut établie par M. Dartigues la cristallerie de Baccarat, qui est devenue l'usine la plus importante pour ce genre de fabrication.

Il s'est ensuite fondé à Clichy, Pantin, Aubervilliers, Sèvres, des cristalleries dont les produits sont à juste titre très estimés.

93. — Fours de cristallerie. — Le mode de construction des fours joue le plus grand rôle dans la qualité et le prix de revient des produits.

Avec des fours rationnellement construits, permettant d'obtenir une température très élevée, il est en effet possible de réduire la proportion des fondants qui sont les matières les plus coûteuses, et, comme, d'autre part, on a reconnu qu'un excès de silice augmentait la blancheur et l'éclat du cristal, on trouve donc un double avantage à pousser le plus possible la température des fours.

Four Pellat-Rikman. — Ce four a une grande analogie avec le four Boétius que nous avons précédemment décrit.

Le gazogène se compose de trois chambres superposées : la chambre supérieure où s'opère le chargement du combustible, la chambre intermédiaire ou chambre à

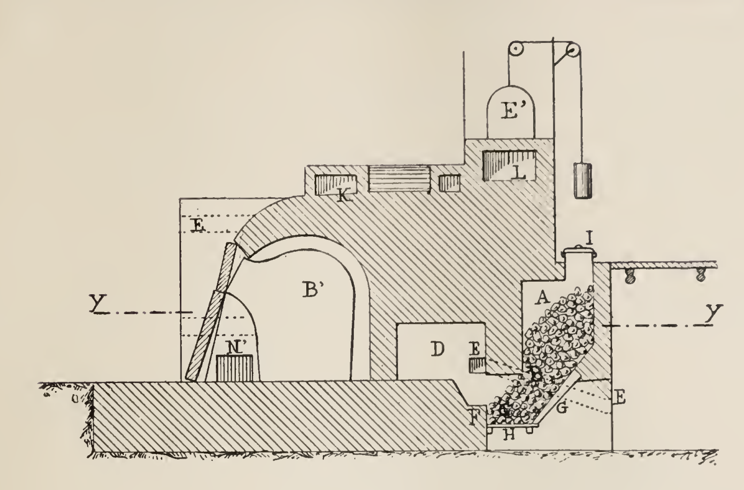


Fig. 114.
Coupe verticale suivant YY.

gaz et la chambre inférieure qui constitue le foyer proprement dit et où s'opère la combustion du coke produit par la transformation de la houille dans les deux premières chambres.

A (*fig.* 114-115) est la chambre où le combustible est enfourné ; B est la chambre où le gaz se forme ; C, la grille ; D, la chambre de combustion dans laquelle le gaz et l'air se mélangent ; E, les carneaux conduisant à la chambre de combustion ; F est la gueule du fourneau G ; une porte permettant de nettoyer la grille ; H, le cendrier ; I, l'ouverture, servant à introduire le combustible ; K sont les carneaux du four conduisant à chaque pot ; L est le carneau général reliant tous les précédents ; B′ sont les pots ; N, les carneaux sous les pots ; et E′, la cheminée.

Le gaz distille en B, descend et rencontre l'air qui pénètre à travers la grille, brûle en partie et entre en pleine combustion en D, mélangé avec l'air qui s'est introduit par E et F. Les conduits d'air sont maintenus chauffés au rouge, de sorte que la chambre de combustion est alimentée par de l'air chauffé à une haute température. Si l'on a besoin dans le four d'une flamme réductrice, les conduits d'air sont fermés en totalité ou en partie.

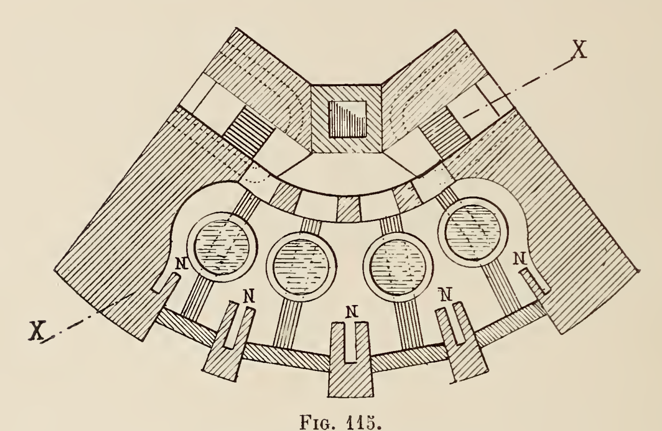


Fig. 115.
Coupe horizontale suivant XX.

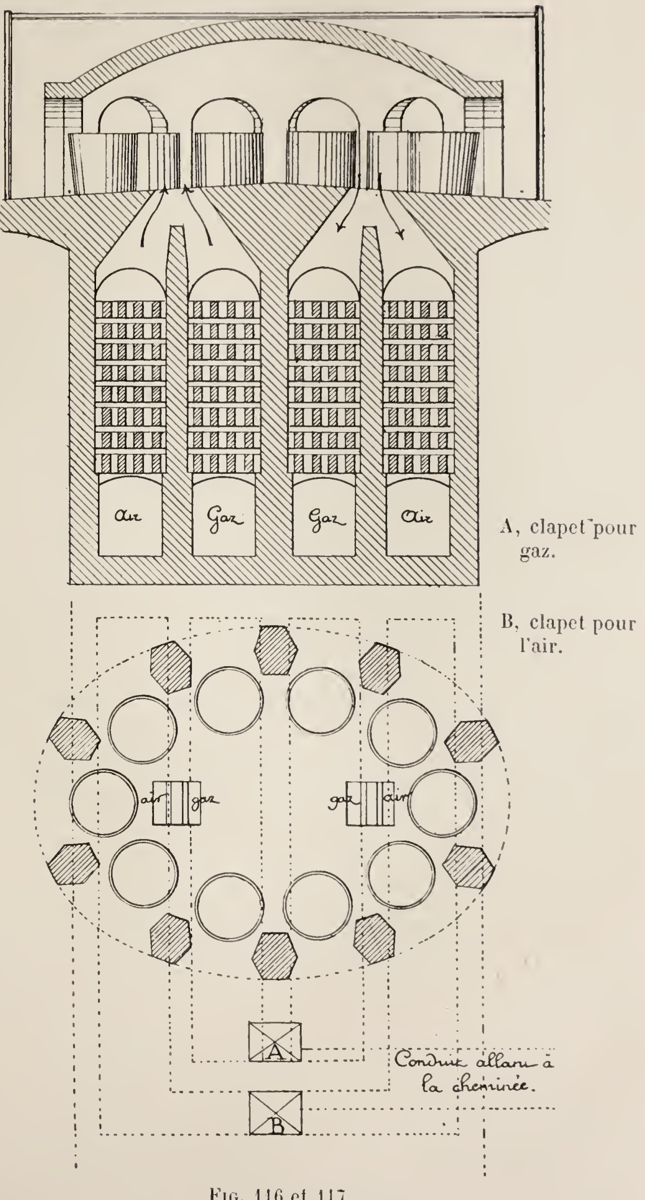
Avec la houille employée généralement dans les chaudières le nettoyage de la grille en G a lieu au bout de dix à douze heures.

Ce four, qui est généralement adopté pour la fabrication dans les pots couverts, est très facile à conduire et donne d'excellents résultats.

En 1865, M. Didierjean, directeur de la cristallerie de Saint-Louis, a fait faire un grand pas à la fabrication du cristal en résolvant le problème délicat d'opérer la fusion du cristal à la houille dans des pots découverts.

Il a adopté la disposition des fours Siemens, mais en établissant les sorties de gaz et d'air de telle sorte que

les pots fussent toujours garantis du contact des gaz réducteurs par un écran d'air.



A, clapet pour gaz.

B, clapet pour l'air.

Fig. 116 et 117.

Pour cela (*fig.* 116-117), les orifices de sortie du gaz sont placés vers l'intérieur par rapport aux sorties d'air.

En outre, il a donné à la voûte une grande hauteur afin de former au-dessus des matières une sorte de coussin d'acide carbonique qui protège le verre dans le cas où il se produit dans le four une trop grande affluence de gaz réducteur.

On n'a pas remarqué que cette manière de faire ait donné des produits de moins belle qualité que ceux qu'on obtient dans le mode de fabrication à pots couverts.

Elle a l'avantage sur cette dernière de donner plus de régularité pendant la fusion.

94. — Composition des matières vitrifiables. — On emploie généralement les matières premières dans les proportions suivantes en poids :

Sable....	3 parties
Minium..	2 »
Potasse..	1 »

en ajoutant une certaine quantité de groisil.

En moyenne, les mélanges sont formés de :

Sable.................	300
Minium...............	200
Carbonate de potasse...	100
Groisil ou déchet......	300 à 500

et encore :

Sable.................	100
Minium...............	66,66
Carbonate de potasse...	28,30
Nitrate de potasse.....	3,30 à 5,50
Bioxyde de manganèse.	0,50
Groisil...............	160

En Allemagne on fabrique un cristal de prix inférieur avec la composition :

Sable	100
Minium	37
Chaux	5
Carbonate de potasse	25

95. — Nous donnons dans le tableau ci-dessous la composition chimique de divers échantillons de cristal.

	CRISTAL ANGLAIS				VONÊCHE	BACCARAT		CHOISY
Silice	61,00	51,93	51,40	59,20	56,00	51,10	50,18	54,20
Oxyde de plomb	33,00	3328	37,40	28,20	34,40	38,30	38,11	34,60
Potasse	6,00	13,67	9,40	9,00	6,60	7,60	11,22	9,20
Soude	»	»	»	»	»	1,70	»	0,90
Chaux	»	»	»	»	»	»	»	0,40
Alumine	»	»	»	»	»	0,50	»	0,50
Oxyde de fer	»	»	2,00	1,40	1,00	0,30	0,44	»
Oxyde de manganèse	»	»	»	»	»	0,50	»	»

On fait quelquefois entrer d'autres matières dans la composition du cristal ; c'est ainsi que MM. Maës et Clémandot, ont fait voir que l'acide borique peut jouer un rôle fort utile dans la fabrication des verres de luxe.

L'emploi de l'acide borique permet de modifier profondément la nature du cristal, de substituer en partie l'oxyde de zinc au minium, la soude à la potasse, la baryte à la chaux, etc.

Les borosilicates de zinc et de potasse, de potasse et de baryte, de soude et de zinc, fabriqués par MM. Maës et Clémandot, soit sous forme de pièces de gobeleterie, soit en pièces d'optique, sont remarquables par leur éclat,

leur transparence, leur limpidité et leur blancheur. Ils sont également plus durs et moins hygrométriques que le cristal ordinaire, propriété qu'ils doivent à leur faible teneur en potasse ou soude.

L'emploi du thallium, préconisé par Lamy en remplacement d'une partie de la potasse, a permis d'obtenir un cristal à forte densité, doué d'un pouvoir dispersif considérable.

Pour la fabrication du cristal, il faut employer les matières premières les plus pures ; aussi, non content de les choisir de qualité exceptionnelle, leur fait-on subir une purification avant leur mise en œuvre.

Sable. — Le sable qui provient généralement d'Étampes, de Nemours et de Fontainebleau, est débarrassé, par lavage, des corps étrangers : argile et matières organiques, qu'il contient toujours. Il est ensuite séché avant l'emploi.

Potasse. — La potasse employée par les cristalleries françaises est obtenue par le traitement des salins de betteraves. Ces carbonates de potasse que fournit le commerce ne sont en effet jamais purs; ils contiennent toujours des sulfates et des phosphates dont la présence n'est pas sans dangers.

Le sulfate, par suite de sa réduction possible, donnerait une coloration jaune; quant au phosphate, il diminuerait la limpidité du verre par sa tendance à lui communiquer l'opalescence.

Pour purifier les potasses, on les dissout dans la plus petite quantité possible d'eau froide, puis on laisse déposer et on décante le liquide clair qu'on évapore à feu doux. Il se dépose d'abord du sulfate de potasse qu'on

recueille. Quand tout le sulfate s'est ainsi précipité, on pousse le feu pour amener le dépôt du carbonate de potasse qui cristallise avec 18 0/0 d'eau.

On l'emploie avec son eau de cristallisation, car on a reconnu que cette eau produisait un effet utile, en favorisant pendant la fusion le brassage des matières, ce qui a pour résultat de donner plus d'homogénéité à la masse.

Minium. — On ne se sert pas de la litharge ou protoxyde de plomb du commerce, parce qu'elle contient des oxydes de cuivre et de fer, qui coloreraient la masse vitreuse. On le remplace par le minium qui, lui, peut être obtenu très pur.

On croit généralement que le minium est employé dans les cristalleries parce que l'excès d'oxygène qu'il contient sert à brûler les matières organiques dont, malgré les soins les plus minutieux, les matières premières peuvent être souillées. Nous pensons que la véritable cause de la préférence accordée au minium sur la litharge est due à ce fait qu'il est impossible d'obtenir cette dernière absolument pure et exempte de plomb métallique. Pendant l'affinage, le plomb métallique décomposerait les traces de carbonate de potasse, qui existent dans le cristal fondu, donnant ainsi naissance à des bulles d'oxyde de carbone qui, se renouvelant sans cesse, rendraient l'affinage très difficile.

Très généralement, les cristalleries préparent elles-mêmes leur minium. On fond le plomb sur la sole d'un four à réverbère où, sous l'action de l'oxygène, il passe à l'état de massicot ou oxyde pulvérulent. Il faut prendre les plus grandes précautions pour éviter que la température ne s'élève trop, car il ne faut pas atteindre le point de

fusion du massicot. Si ce dernier entrait en fusion, l'oxydation totale ne pourrait en effet se produire.

Cette partie du travail est la seule où les ouvriers soient exposés à respirer les poussières plombiques ; le reste du travail s'opère mécaniquement, dans des enveloppes bien fermées.

Quand, dans l'opération précédente on a obtenu une oxydation aussi complète que possible, on recueille le massicot et on le soumet à un lavage et à un malaxage simultanés, afin de le séparer du plomb non oxydé et du sous-oxyde qui a pu se former. Ces masses plus lourdes, appelées *sons*, se déposent les premières, et on recueille dans les derniers bacs un massicot très fin, auquel on donne le nom de farine. Ce massicot représente 80 0/0 du plomb employé.

Après dessiccation, on le place dans des petites caisses ou ferrasses, qui sont introduites dans un four, où s'opère l'oxydation. La matière devient rouge, et le produit final contient généralement 80 0/0 de minium et 20 0/0 de massicot. On broie ensuite ce minium pour l'amener à l'état de poudre impalpable.

96. — Travail du cristal. — Le travail de gobeleterie du cristal ne diffère guère de celui dont nous avons parlé plus haut. Presque toutes les pièces creuses sont empontillées et ont leurs bords rebrûlés, c'est-à-dire arrondis au feu, soit au four, si les bords ont été coupés au ciseau, soit au chalumeau Schlœsing, s'ils ont été coupés à la roue ou au diamant. Ce mode d'opérer est particulièrement facile avec le cristal, tant par suite de sa grande fusibilité qu'à cause de sa résistance à la dévitrification, ce qui permet de réchauffer les pièces un plus grand nombre de fois.

Pour fabriquer un verre à pied de grandeur ordinaire (voir *fig.* 118, qui indique les diverses phases de cette fabrication), le cueilleur puise dans le creuset, à l'aide de la canne, la quantité de verre nécessaire pour faire la paraison de la coupe et la passe au carreur, qui donne à cette paraison la forme voulue; celui-ci la remet à l'un des souffleurs, chargé d'y appliquer la jambe. La jambe grossie, la pièce passe entre les mains d'un autre souf-

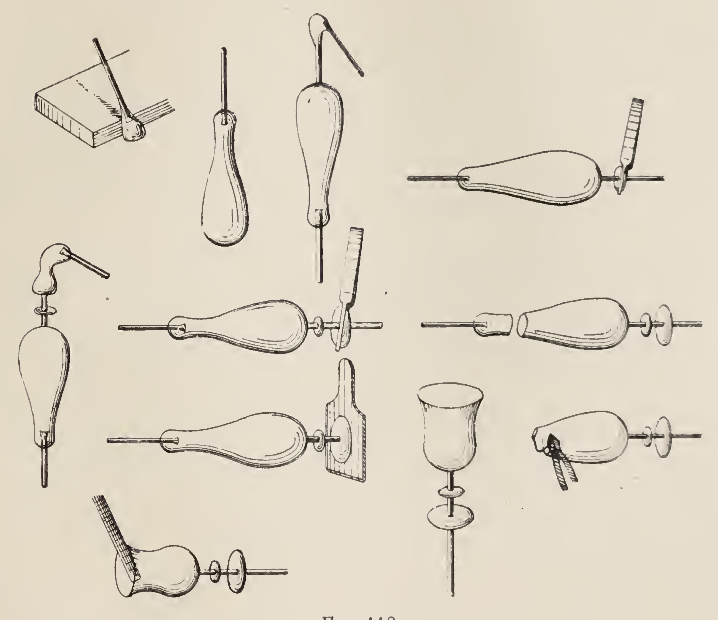


Fig. 118.

fleur, dont l'office est d'y adapter le pied, en faisant tourner sa canne déposée sur le « bave » et pressant le verre à l'aide d'une pince à ressort. Pendant ce temps, le second souffleur a fait, à l'aide d'une autre canne, une boule creuse à parois relativement épaisses; il la fixe au pied et la sépare de sa canne à l'aide de ciseaux. On réchauffe cette portion de verre destinée à faire le pied,

et l'ouvrier introduit une pince à étaler à l'intérieur de la portion creuse et lui donne la forme plane, à l'aide de la palette. En tournant rapidement la canne, on coupe les bords du pied aux ciseaux, on les dresse à la pince, et on les fond devant l'ouvreau du four. On fixe alors, avec un peu de verre fondu, un pontil au milieu du pied et on coupe le verre attaché à la canne ; l'aide chauffe à l'ouvreau la portion antérieure du verre, de façon à la ramollir; l'ouvreur écarte alors les parois à l'aide d'une pince à élargir et de la palette, puis il enlève le bord à l'aide de ciseaux, fait fondre les bords par le gamin, et l'évase; après cela, il y met la dernière main, et la pièce est portée à recuire. Pour les verres de Bohême, les bords sont, en général, usés à la meule, au lieu d'être arrondis au feu.

Les pièces qui doivent présenter des cannelures ou être ornementées sont fabriquées par soufflage et moulage combinés dans des moules en plusieurs pièces. Pour que le cristal reçoive une empreinte bien nette, il faut le souffler fortement; aussi, pour cette raison, le souffle humain est-il presque partout remplacé par la pompe Robinet et, dans le cas de pièces de grandes dimensions, par le soufflage à l'air comprimé.

Taille du cristal. — La découverte du cristal a amené une modification notable dans le mode de décoration du verre. La nouvelle matière était en effet de beaucoup supérieure au verre, et sous certains rapports supérieure, même, au cristal de roche, en ce sens que, taillé en forme de prisme, le cristal possède, comme le diamant, la propriété de décomposer la lumière, propriété que ne possèdent ni le cristal de roche ni le verre de Bohême.

Il en résulta, dès l'apparition du nouveau verre, que

les fabricants anglais, afin de mieux faire valoir cette qualité particulière, le taillèrent de façon à obtenir des facettes saillantes réfléchissant la lumière, des prismes la réfractant. Ils obtinrent ainsi un ensemble donnant aux objets l'apparence de diamants aux feux les plus brillants.

La taille comprend trois opérations : l'ébauche, le douci, le poli.

L'ébauche s'exécute avec une meule ou roue en fer, sur laquelle on laisse tomber continuellement une boue de sable dur ou de grès. L'ouvrier tailleur, assis sur un tabouret, tient dans les mains la pièce à ébaucher, qu'il présente à la roue, soit pour enlever les traces de l'empontillage, soit pour déterminer les facettes de taille proprement dites.

Le douci se fait avec une roue en grès ou en pierre, humectée d'eau. Pour terminer le travail, on se sert d'une roue en liège, couverte de potée d'étain, et en dernier lieu d'une roue circulaire, en soies de porc, qui pénètre dans toutes les concavités des parties taillées et ne laisse aucun point défectueux.

Le mode de travail se modifie suivant la nature et la forme de l'objet; ainsi les bouchons de carafe, qui doivent avoir le même diamètre que le goulot, sont travaillés verre sur verre de la façon suivante : le bouchon est fixé sur un bloc en bois et pivote, à l'ouverture de la carafe, sous un filet d'eau entraînant du sable fin ; les deux surfaces s'usent mutuellement et simultanément, et le bouchon s'enfonce peu à peu dans le goulot du vase, qu'il doit servir à fermer.

Outre la gravure à la roue, nous signalons la gravure à l'acide fluorhydrique, qui attaque le cristal en clair. La gravure mate s'obtient, comme nous l'avons dit, par l'action des fluorures doubles.

§ 3. — Verre d'optique

97. — Historique. — La fabrication des verres d'optique est de date encore récente.

Pendant très longtemps on se procurait le verre nécessaire aux opticiens en choisissant parmi les morceaux de verre ordinaire ceux qui remplissaient le mieux les conditions requises.

Les Anglais ont fait de vains efforts pour réussir dans la fabrication de ce verre particulier, qui doit être tel que les images ne présentent pas de coloration sur les bords.

Newton avait nié la possibilité d'obtenir l'achromatisme, mais Euler, remarquant que l'œil est une lentille parfaitement achromatique, émit une opinion contraire qui peu après fut confirmée d'une façon éclatante.

Les objectifs sont construits par la juxtaposition de deux lentilles, l'une en flint ou cristal, l'autre en crown ou verre blanc ordinaire, absolument pur et sans défaut.

C'est à Pierre-Louis Guinand, né aux Brenets, canton de Neufchâtel, en Suisse, que l'on doit la découverte des procédés qui permettent d'obtenir, méthodiquement et à coup sûr, le verre d'optique.

La difficulté consistait à éviter la formation des stries ou ondes qui résultent d'une homogénéité imparfaite de la masse de verre fondu et d'un refroidissement inégalement rapide de cette masse.

Guinand eut l'idée de brasser le verre avec une matière de même composition que le creuset. Après l'affinage, il soumettait pendant six à sept heures le verre à un brassage énergique, puis il laissait refroidir le creuset et son

contenu. Ce refroidissement était effectué avec une lenteur extrême, il ne demandait pas moins d'un mois et demi à deux mois pour être complet.

98. — Compositions vitrifiables. — La composition de Guinand était la suivante:

Flint

Sable.	225
Minium	225
Potasse perlasse.	52
Borax	4
Nitre.	3
Oxyde de manganèse . . .	1
Acide arsénieux.	1
Résidus de flint.	89

Crown

Sable	400
Potasse perlasse.	160
Borax	20
Minium	20
Oxyde de manganèse . . .	1

Le chimiste verrier bien connu, Bontemps, d'abord associé avec le second fils de Guinand, puis devenu, en 1848, le collaborateur de MM. Chance, de Birmingham, a pu obtenir, par les procédés de mâclage et de refroidissement dont nous venons de parler, des disques parfaits de flint et de crown, sous des dimensions considérables et pesant jusqu'à 200 kilogrammes.

Depuis cette époque, MM. Chance ont apporté des modifications à leurs compositions, ils emploient généralement cinq sortes de verre d'optique, dont trois sortes de flint et deux sortes de crown.

Nous les indiquerons ici, en rappelant également les compositions qu'employait Bontemps.

Compositions de Bontemps

	Flint-glass	Crown
Sable	43,5	100
Carbonate de potasse . . .	10,0	42,66
Nitrate de potasse	3,0	2,00
Rouge de plomb	43,5	»
Chaux.	»	21,66
Arsenic	»	0,25

Compositions employées chez MM. Chance, de Birmingham

	Crown tendre pour objectifs de photographie	Crown dur pour télescopes
Sable	100	100
Minium	9,46	»
Carbonate de potasse. . .	45	42,66
Chaux	9,46	21,66
Salpêtre.	1,89	2,00
Arsenic	»	0,75

	Flint léger pour photographie	Flint lourd pour télescopes	Flint extra-lourd pour microscopes
Sable	100	100	160
Minium	67	105	128
Carbonate de potasse. .	30	26,66	25
Salpêtre.	3,33	4,8	2
Chaux	0,41	0,17	»

On remarquera la forte teneur en plomb de ces flints, mais nous insisterons sur ce fait que le point essentiel dans la fabrication consiste surtout à brasser constamment le verre pendant la fusion et l'affinage.

Faraday apporta des modifications à la composition ainsi qu'au mode de fabrication du flint; il produisit un verre connu sous le nom de verre lourd de Faraday, dont

pendant longtemps les propriétés furent utilisées dans les expériences relatives à la polarisation de la lumière par l'action magnétique.

Ce verre était composé de :

Silicate de plomb. . . .	104
Protoxyde de plomb . .	24
Acide borique sec. . . .	25

Il fond à une température très basse, mais il est très altérable à l'air; aussi son emploi est-il maintenant tout à fait abandonné.

M. Feil, arrière-petit-fils de Guinand, s'est particulièrement distingué dans ce genre de fabrication. Il a pu préparer absolument pures et exemptes de défauts des pièces énormes, entre autres un objectif de 97 centimètres de diamètre.

Voici quelques-unes des compositions qu'il emploie :

	Crown pour objectifs de longue vue	Crown pour photographie
Sable	100	100
Carbonate de potasse . . .	35	31
Carbonate de soude	10	10
Carbonate de chaux. . . .	15	15
Minium	0	5
Indice de réfraction	1,514	1,5347

	Flint	Flint pour objectifs de longue vue	Flint léger pour objectifs de photographie
Sable	100	100	100
Minium	108	105	70
Carbonate de potasse . . .	13	14	18
Nitrate de potasse.	10	6	5
Acide borique	5	0	6
Bioxyde de manganèse. .	»	0,100	0,120
Indice de réfraction	1,64	1,628	1,5863
Densité	3,62	3,60	3,20

99. — Fabrication du verre d'optique. — Le verre d'optique est fabriqué dans de petits fours circulaires ne contenant qu'un seul creuset ayant généralement la forme des creusets de cristallerie. Le verre fondu est brassé par intervalles, pendant une période variant de douze à vingt-quatre heures à l'aide d'un cylindre en terre réfractaire de 8 à 10 centimètres de diamètre et d'une longueur égale à la hauteur occupée par le verre dans le creuset.

Ce cylindre est fixé à l'extrémité d'un crochet en fer s'appuyant, à l'extérieur du four, sur un support sur lequel il peut glisser. A l'aide d'une traverse en bois passée dans l'œil du crochet un ouvrier brasse la masse de verre jusqu'à disparition complète des stries (*fig.* 119, 120).

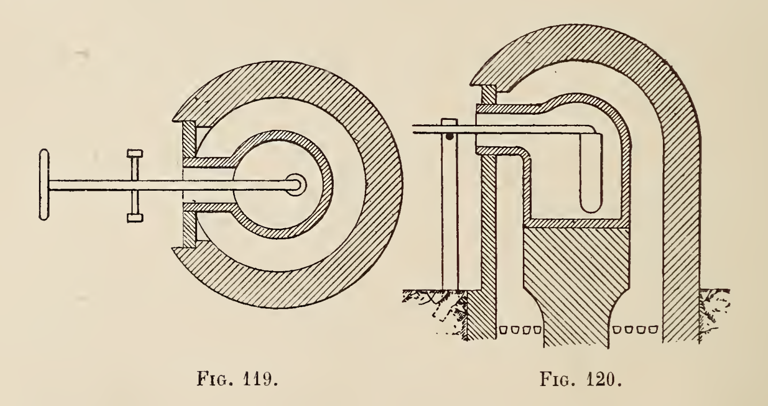


Fig. 119. Fig. 120.

Le dernier brassage est conduit jusqu'à ce que la masse de verre ait pris une assez grande consistance.

Le creuset est alors retiré du four et mis avec son contenu à recuire dans une arche spéciale.

Quand le refroidissement est complet, on isole la masse de verre en un bloc qu'on taille suivant des faces parallèles qui permettent d'examiner son état de pureté.

Les défauts sont enlevés par des sciages.

Quand on a obtenu un bloc de verre absolument pur ayant le volume requis pour la fabrication d'une pièce déterminée, il ne reste plus qu'à le mouler dans une arche spéciale pour l'amener à la forme du disque qu'on a en vue de fabriquer.

Cette opération demande à être conduite avec une lenteur extrême, afin d'amener progressivement toute la masse à la température de ramollissement du verre. On lui fait prendre alors la forme et l'épaisseur voulues, puis on clôt hermétiquement l'arche pour que la recuisson soit parfaite.

On s'assure de la réussite de cette opération par l'examen d'un rayon de lumière réfléchi au travers de la masse et d'un prisme de Nichols.

Nous n'insisterons pas sur la fabrication du crown, qui présente beaucoup moins de difficultés ; il est d'ailleurs démontré que, dans la plupart des cas, le verre à glaces de Saint-Gobain en remplit parfaitement le rôle, tout en possédant une plus grande résistance aux diverses causes d'altération : contact de l'air humide, variations de température, etc.

100. — Qualités à exiger des verres d'optique. — Ces verres doivent être aussi incolores que possible, sans stries ni fils, homogènes et peu trempés. On se rend compte de la qualité du verre en le plaçant, après l'avoir poli grossièrement au préalable, devant l'objectif d'une lunette. En recevant le faisceau lumineux d'une petite flamme placée à distance convenable, on aperçoit les défauts qui sont décelés par des différences d'intensité lumineuse.

Les moindres variations de densité, la trempe, sont ainsi aperçues très facilement.

101. — Taille des lentilles. — Pour les lentilles de petites dimensions, le travail ne présente aucune difficulté. Il s'exécute à l'aide d'outils en cuivre (*fig.* 121-122), dits « balle » et « bassin », ayant la forme et la courbure qu'on désire donner à la lentille.

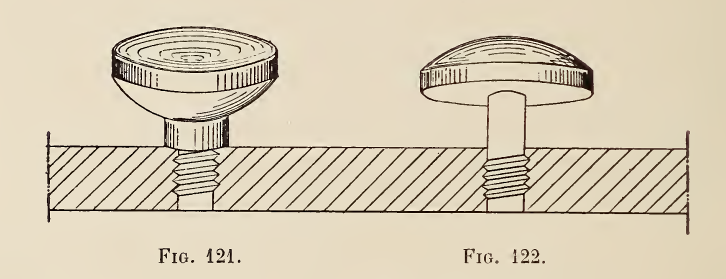


Fig. 121. Fig. 122.

Le doucissage s'obtient par rodage à l'émeri et à l'eau des lentilles préalablement dégrossies et débordées ; quant au polissage, il est donné de la façon suivante : on colle sur les outils une feuille de papier régulier et très fin (le papier albuminé de photographie convient fort bien) qu'on imprègne de tripoli réduit en poudre impalpable.

Pour les pièces de dimensions considérables, l'adhérence énorme qui se produit entre le verre et l'outil rendrait le travail très pénible et fort incertain ; aussi Foucault a imaginé de les travailler verre sur verre en remplaçant les outils en métal par des outils en verre. On emploie généralement la dalle de Saint-Gobain à laquelle, pour cet usage, on donne une cuisson toute spéciale.

Les lentilles destinées aux grands objectifs d'astrono-

mie sont travaillées sur un « poste », sorte de pilier solidement établi, isolé de toutes parts et portant les outils en verre amenés au préalable à la courbure voulue. Verticalement au-dessus de ce poste, on fixe au plafond un fort piton où s'accroche un ressort à boudin capable de supporter le poids de la lentille.

Sur l'outil en verre on étend de l'émeri gros délayé avec de l'eau, et par dessus on dépose avec précaution la lentille à travailler. On use ensuite les deux verres l'un sur l'autre en prenant la précaution de changer fréquemment le sens du mouvement, de façon à distribuer l'action également dans tous les sens. Quand l'émeri a perdu son mordant, on relève la pièce, on éponge les deux surfaces et on renouvelle l'émeri.

On emploie des émeris de plus en plus fins qu'on désigne, dans le commerce, d'après le temps qui est nécessaire à leur séparation, quand on en fait le classement à l'aide d'un courant d'eau. C'est ainsi qu'on a des émeris à une, deux... trente, quarante minutes.

Pendant le travail de ces émeris, il est indispensable de recourir aux indications fournies par le sphéromètre, car les courbes relatives des surfaces se modifient sans cesse par fractions infiniment petites, il est vrai, mais dont il faut absolument tenir compte dans un travail où les millièmes de millimètre ne sont pas quantité négligeable.

Le poli est obtenu par plusieurs procédés. Celui qui convient le mieux aux lentilles objectives est le polissage au papier et au tripoli. Sur la surface même du disque qui a servi à doucir le miroir on colle une feuille de papier dont la trame est d'aspect aussi régulier que possible. Après séchage, on dégarnit cette feuille en la frottant avec une éponge légèrement humide. Dans cet état, elle retient mieux la matière à polir.

Le miroir lavé et séché est disposé sur ce polissoir, qui le touche de toutes parts et lui donne le poli en très peu de temps. Si la surface présente quelques petites imperfections, on procède à une retouche locale à l'aide de polissoirs préparés comme nous venons de le dire, mais beaucoup plus petits et proportionnés aux défauts qu'il est utile de faire disparaître.

102. — Pouvoir optique des objectifs. — Pouvoir séparateur. — Lorsque les défauts auront disparu, l'objectif ou le miroir devra montrer en son foyer les phénomènes caractéristiques de la diffraction, c'est-à-dire qu'il devra donner d'un point lumineux, d'une étoile par exemple, un disque lumineux circulaire entouré d'anneaux circulaires d'une intensité rapidement décroissante. Et, si ce résultat est obtenu, on peut être assuré que, dirigé sur toutes espèces d'objet terrestre ou céleste, il donnera de bonnes images.

Mais, pour juger plus sûrement du résultat, Foucault a proposé de diriger l'objectif ou le miroir sur une mire lointaine systématiquement composée de manière à offrir à l'observation des détails placés à la limite de visibilité. Il construisait ces mires d'épreuve en traçant sur une lame d'ivoire des séries de divisions partagées en groupes successifs où le millimètre est fractionné en parties de plus en plus petites.

La largeur du trait doit varier d'un groupe à l'autre en proportion telle que, dans chacun d'eux, les espaces noircis aient la même étendue que l'intervalle qui les sépare.

En observant une pareille mire avec des instruments de qualités et de dimensions différentes, on reconnaît bien vite que l'aptitude de l'instrument à pénétrer les détails des objets observés, ou ce qu'on peut appeler son

pouvoir optique, est inversement proportionnelle à l'angle limite de séparabilité des divisions contiguës : il a, en définitive pour expression le quotient de la distance de la mire par l'intervalle moyen des dernières parties distinctes.

Or, de nombreuses épreuves faites sur des miroirs et des objectifs de toutes dimensions l'ont conduit à une expression des pouvoirs optiques remarquable par sa simplicité : *Le pouvoir optique est indépendant de la distance focale et proportionnel à l'étendue transversale de la portion efficace de l'objectif du miroir.* La valeur du rapport constant qui existe ainsi entre le pouvoir optique de l'objectif ou du miroir, et son diamètre utile, est d'ailleurs égale à 1,500, étant donné que l'on suppose ce diamètre exprimé en millimètres, en d'autres termes le pouvoir optique d'un objectif ou d'un miroir d'un diamètre égal à D (en millimètres) est égal à $1\,500 \times D$.

L'expression imaginée par Foucault pour caractériser un objectif ou un miroir n'a pas été adoptée par la majorité des astronomes.

Au lieu du pouvoir optique, la plupart d'entre eux se servent de la caractéristique découverte autrefois par Dawes, et qu'il appelait pouvoir séparateur. Cette dernière est évidemment l'inverse de ce que Foucault a appelé ensuite pouvoir optique, et elle désigne l'angle limite de séparabilité de l'instrument. Ce pouvoir séparateur est d'ailleurs proportionnel au diamètre utile de l'objectif ou du miroir, et il est défini par cette constante qu'un objectif ou un miroir de 10 centimètres de diamètre utile sépare deux étoiles de cinquième à sixième grandeur séparées par un intervalle angulaire à $1'',3$.

Grossissement utile. — De même que le pouvoir

optique ou le pouvoir séparateur d'un instrument parfait dépend seulement du diamètre utile de son objectif ; de même aussi l'ouverture de cet instrument limite la valeur maximum du grossissement qu'on lui doit utilement appliquer. L'image focale donnée par l'objectif est pour ainsi dire une photographie dont les détails sont de plus en plus séparés à mesure que l'ouverture de l'instrument augmente. Mais, pour apercevoir nettement les détails, il convient de ne pas diminuer au-delà d'une certaine limite l'éclairement de l'image focale, c'est-à-dire de ne pas augmenter au-delà d'une certaine limite le grossissement employé. L'expérience a montré que le grossissement maximum utilement employé était égal au double de l'ouverture, exprimé en millimètres. Ainsi, par exemple, pour un objectif de 75 centimètres de diamètre le grossissement maximum qu'il est utile d'employer est de quinze cents fois.

103. — Verres de lorgnettes. — La fabrication des verres de jumelles présente des difficultés spéciales, car il est nécessaire que les deux parties soient identiquement semblables.

Le travail s'exécute comme celui des lentilles. Le mastic employé généralement pour rendre les verres adhérents aux molettes est composé de :

Blanc de Meudon.	20^k
Cendres de bois	4,500
Bois de Norwège	8
Cire jaune	0,200
Suif.	0,100
Noir de fumée	0,050

Les verres sont étudiés au point de vue de la trempe

avant d'être mis en travail, car, même faiblement trempé, un verre ne peut constituer qu'un objectif de qualités irrégulières et instables. Nous avons dit plus haut qu'on s'appuie, pour cette recherche de la trempe, sur les propriétés des rayons polarisés.

Nous croyons utile de donner ici, pour terminer ce chapitre relatif aux verres d'optique, les indices de réfraction particuliers à quelques verres, flints et crowns et à quelques corps vitrifiés.

104. — Tableau des indices de réfraction pour les sept raies principales du spectre.

Nos Corps monoréfringents. Densité. Température. B. C. D. E. F. G. H.

NUMÉROS	CORPS Monoréfringents	DENSITÉ	TEMPÉRATURE	B	C	D	E	F	G	H
	FLINTS									
	Feil lourd n° 2..	5.00	22°5	1.7801	1.7831	1.7920	1.8062	1.8149	1.8368	1.8567
	Rossette lourd n° 3.........	4.08	12°4	1.6771	1.6795	1.6858	1.6959	1.7019	1.7171	1.7306
	Feil F. (1249)...	3.68	24°0	1.6237	1.6255	1.6304	1.6384	1.6429	1.6549	1.6647
	Robichon......	3.63	13°7	1.6131	1.6149	1.6198	1 6275	1.6321	1.6435	1.6534
	Feils B (1227)..	3.54	23°2	1.6045	1.6062	1.6109	1.6183	1.6225	1.6335	1.6428
	CROWNS									
	Feil lourd (1185)	3.00	21°9	1.5554	1 5568	1.5604	1.5658	1.5690	1.5769	1.5836
	Feil (1209).....	2.80	21°2	1.5157	1.5166	1.5192	1.5234	1.5256	1.5313	1.5360
	Rossette, n° 1.	2.55	18°4	1.5226	1.5237	1.5265	1.5307	1,5332	1.5392	1.5442
	Saint-Gobain (glace brute).	2.50	17°8	1.5244	1.5254	1.5280	1.5320	1.5343	1.5397	1.5443
	Feil léger (1228)	2 49	23°5	1.5126	1.5134	1.5160	1.5198	1.5222	1.5278	1.5323
	FLINTS légers									
	Rossette n° 1...	3.44	19°5	1.5966	1.5982	1.6027	1.6098	1.6141	1.6246	1.6338
	Feil (1226).....	3.24	22°0	1.5766	1.5783	1.5822	1.5887	1.5924	1.6018	1.6098
	Rossette n° 2..	3.22	18°4	1.5659	1.5675	1.5715	1.5776	1.5813	1.5902	1.5979
	Feil très léger (1232).......	2.98	23°2	1.5609	1.5624	1.5660	1.5715	1.5748	1.5828	1.5898

CORPS MONORÉFRINGENTS	INDICE de réfraction	PARTIE du SPECTRE	AUTEURS
Diamant incolore	2.414 2.428	Rouge (2) Vert (2)	(2) Des Cloizeaux
— brun	2.487		
Clace Saint-Gobain ancienne 1,505 à	1.510		
Clace Saint-Gobain nouvelle 1,525 à	1.540		
Grenat almandine d'un beau rouge	1.772	Rouge (2)	
Hyalite sans action sur la lumière polarisée	1.4374	Rouge (1)	(1) De Senarmont
Obsidienne enfumée du Mexique	1 482 1.485	Rouge lie (2) jaune (2)	
Opale incolore à peine laiteuse	1.442	Rouge (2)	
— incolore chatoyante de Guatémala	1.446	Rouge (2)	
— de feu jaune foncé de Guatémala	1.450	Rouge 2)	
Quartz fondu	1.449 1.457	Rouge (1)	
Spath-fluor vert dichroïde	1.433 1.435	Rouge (2) Jaune (2)	
Spinelle d'un joli rose	1 7121 1.7155	Rouge lie (2) Jaune (2)	
Verre antique de Pomponiana, près d'Hyères (Var) verdâtre.	1.519	Jaune (2)	
Verre antique de Pomponiana, près d'Hyères (Var) jaunâtre.	1.512	Jaune (2)	
Verre de thallium (densité n° 1)	1 690	Raie D (6)	(6) Lamy

§ 4. — Phares

105. — Historique. — Le plus ancien phare dont l'histoire fasse mention est celui du promontoire de Sigée. Le Pirée et la plupart des ports de la Grèce avaient des phares qui en indiquaient l'entrée aux navigateurs. Celui qui fut élevé dans l'île de Pharos (par Ptolémée-Philadelphe, en l'an 270 avant J.-C.) passe pour avoir donné son nom à tous les appareils et constructions du même genre.

Pendant leur séjour dans les Gaules, les Romains avaient établi de nombreux phares sur les côtes de France, témoin celui de Boulogne-sur-Mer, dénommé Tour d'Ordre, dont on voyait encore les ruines en 1863.

L'éclairage des phares a été obtenu pendant longtemps par des feux de bois ou de charbon, par des torches de résine, puis par des lampes grossières.

L'invention des lampes à double courant d'air par Argand, en 1784, puis l'emploi de réflecteurs métalliques furent les premiers progrès sérieux qui furent réalisés.

Les réflecteurs métalliques furent complètement abandonnés à la suite de l'invention de Fresnel qui, en 1821, imagina les phares lenticulaires.

Au lieu de faire usage d'une lentille d'une seule pièce, dont la fabrication, même limitée à des lentilles de grandeur moyenne, présente de sérieuses difficultés, et dont le prix de revient est par suite très élevé, Fresnel eut l'idée de constituer la surface réfringente en réunissant sur une lame à surface parallèle :

1° Une lentille plan-convexe L, de faible ouverture angulaire;

2° Une série d'anneaux dont les surfaces convexes sont calculées de telle sorte que toutes aient le même foyer F que la lentille centrale (*fig.* 123, 124, *a*, *b*, *c*, *d*).

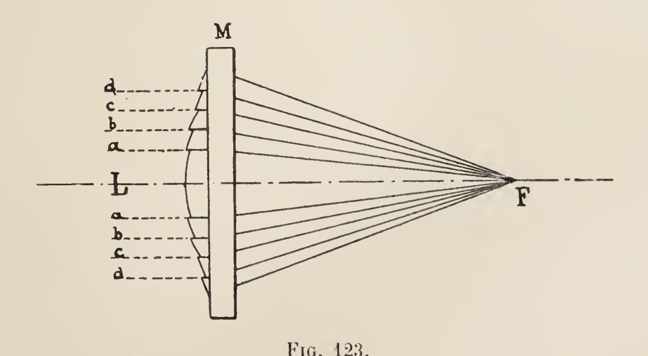


Fig. 123.

Cet ensemble constitue la lentille à échelons de Fresnel. Elle absorbe à peu près 1/20 de la lumière incidente.

Ces lentilles sont destinées à dévier les rayons divergents qui émanent du foyer et à les diriger vers l'horizon, au lieu de les laisser se perdre dans le ciel ou éclairer inutilement la mer dans le voisinage immédiat du phare. Les rayons qui vont du foyer à l'horizon n'ont pas besoin d'être déviés, tous les autres doivent subir une déviation

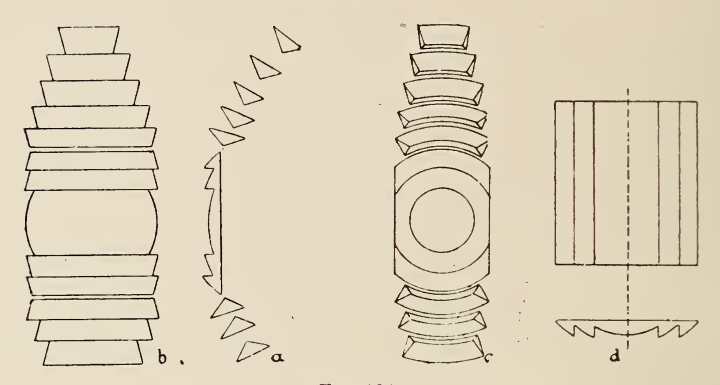


Fig. 124.

d'autant plus grande qu'ils font un angle plus grand avec l'horizontale. Tant que cet angle est supérieur à 40°, on obtient la déviation de ces rayons obliques en construisant la lentille à échelons de façon telle qu'elle ait son foyer principal au foyer même du phare; dans ce cas, en effet, le foyer principal se trouve être le point commun de croisement, derrière la lentille, de tous les rayons dirigés sur elle parallèlement à son axe, et réciproquement tous les rayons dirigés de ce point sur la lentille sortent de celle-ci avec une direction parallèle à son axe.

Au-delà de 40° on obtient la déviation de ces rayons obliques, en ayant recours à la réfraction et à la réflexion pour les ramener dans l'horizontalité.

Ils subissent une première déviation en pénétrant dans un prisme triangulaire en verre, viennent ensuite ren-

contrer une autre face de ce même prisme sous un angle tel qu'ils sont totalement réfléchis et sortent enfin par la troisième face, qui les dévie une dernière fois par réfraction et achève de leur donner la direction voulue.

Les prismes qui agissent par réfraction et par réflexion ont reçu le nom de prismes catadioptriques; ils constituent la zone catadioptrique de la lentille; on appelle tambour dioptrique la portion de l'enveloppe lenticulaire qui n'agit que par réfraction.

Il n'entre pas dans le cadre de cet ouvrage de donner la description des dispositions multiples qui ont été adoptées dans la construction des phares et qui les distinguent en phares à feux fixes et en phares tournants, avec ou sans éclipse, avec ou sans éclat.

Nous ne nous occuperons que du mode de fabrication des pièces en verre qui constituent ces appareils, ainsi que des qualités que doit présenter ce verre.

On a d'abord préparé les anneaux en soumettant au ramollissement des pièces de verre qu'on cintrait et qu'on réunissait bout à bout. Aujourd'hui, ces pièces sont obtenues, en une ou plusieurs parties, suivant les dimensions, par coulage dans des moules, ou lingotières, en fonte avec lesquels elles sont mises à recuire dans des arches spéciales.

106. — Composition du verre pour phare. — Le verre de Saint-Gobain est exclusivement employé à la construction des phares en France. Il a pour composition :

Silice	72,1
Soude.	12,2
Chaux	15,7
Alumine et oxyde de fer . . .	traces
	100,0

La forte teneur de ce verre en silice et en chaux le rend très dur et inattaquable à l'air ; sa pureté, sa faible coloration et l'absence presque complète des ondes ou stries le rendent particulièrement propre à cette application. Il n'absorbe, en effet, que un demi pour cent de lumière par centimètre d'épaisseur ; quant à la perte par réflexion, elle est évaluée à 10 0/0 de la lumière incidente pour les incidences comprises entre la normale et 45° ; au-delà de 45° elle augmente progressivement.

107. — Travail des pièces de phares. — Le travail des pièces de phares s'effectue de la façon suivante : après avoir collé sur un cercle en fonte, au moyen de poix fondue, les morceaux constituant un anneau, on le monte sur un tour à arbre vertical et à plateau horizontal ; on achève le centrage pendant que la poix est encore malléable.

Après refroidissement on commence le travail du dégrossissage, qui consiste à appliquer contre la surface de l'anneau un frottoir en fonte enduit de grès mouillé. Quand la surface est suffisamment lisse on imprime au frottoir un mouvement de va-et-vient destiné à effacer les sillons creusés par les grains de sable et à donner à la surface la courbure que le calcul lui a assignée suivant la place que l'anneau doit occuper dans la lentille. A cet effet, le frottoir est emmanché au bout d'un bras assujetti à osciller entre deux points. La longueur du bras détermine le rayon de courbure de la surface ; la position du centre détermine son inclinaison par rapport au plan horizontal. Quand le verre est complètement dégrossi, on passe au travail à l'émeri, qu'on emploie de plus en plus fin, puis au poli, qu'on obtient avec un frottoir en fonte garnie de feutre avec interposition de colcothar.

Le travail de ces pièces demande à être exécuté avec les soins les plus minutieux, car leurs qualités optiques dépendent principalement de l'exactitude de leurs formes géométriques et, par conséquent, de la bonne construction des outils avec lesquels on les travaille.

Toute inexactitude de forme se traduit par une perte de lumière. Les déformations qui ne peuvent être évitées dans le voisinage des arêtes sont une cause de perte qu'il importe de réduire au minimum en faisant les arêtes aussi fines que possible et en ne multipliant pas outre mesure les prismes, en vue d'en réduire l'épaisseur. Il n'y aurait aucun avantage à descendre au-dessous de la largeur de 10 centimètres, qui est adoptée aujourd'hui pour les surfaces réfléchissantes des prismes catadioptriques des trois premiers ordres, soit pour ceux dont la distance focale est $0^{m},97$, $0^{m},70$ et $0^{m},50$.

Avant de monter les lentilles dans leurs cadres en bronze, on vérifie les anneaux dioptriques par la méthode des foyers conjugués qui consiste à les exposer à la lumière d'une lampe placée en avant de l'anneau, à une distance connue, et dont on recueille l'image sur un écran placé de l'autre côté.

Les anneaux catadioptriques ne peuvent être vérifiés de la même manière. Les châssis qui les portent sont formés de trois jougs en bronze percés d'ouvertures un peu plus grandes que la section de l'anneau, de manière que celui-ci y entre facilement. On détermine sa position exacte en plaçant au foyer de l'appareil une petite boule représentant la flamme et en observant l'image de cette boule, d'une règle placée verticalement à une certaine distance en avant de l'appareil, et sur laquelle on a marqué des traits correspondants aux centres des anneaux et de niveau avec eux.

En plaçant l'œil vis-à-vis de chacun de ces traits on doit avoir l'image de la boule au centre du prisme correspondant, si celui-ci est bien placé. S'il n'est pas dans la bonne position, on l'y amène et on l'y maintient au moyen de petites cales en bois qu'on introduit entre le bord de l'alvéole et le prisme. On achève ensuite de remplir les vides avec un mastic de céruse et d'huile de lin, qui, au bout de quelque temps, devient très dur et ne se prête plus à aucun déplacement des prismes.

108. — Projecteurs électriques. — L'importance des projecteurs croît de jour en jour dans la tactique navale [1]. C'est le plus efficace moyen de défense que possèdent les cuirassés contre les attaques nocturnes des torpilleurs. Pour la protection des côtes et la défense des passes, les projecteurs sont encore d'un service extrêmement apprécié. Aussi leur emploi se généralise-t-il de plus en plus, non seulement sur les navires de guerre qui en possèdent maintenant chacun six et même huit, mais encore dans les blockhaus de nos forts et même dans les sections techniques de nos corps d'armée en campagne. Les premiers appareils employés pour les projections électriques étaient métalliques à section parabolique ; le poli disparaissait rapidement et avec lui les propriétés réfléchissantes du miroir.

Fresnel substitua au miroir des lentilles de verre savamment combinées pour donner au faisceau lumineux

[1] Le nombre total des projecteurs actuellement en service dans le monde entier est de plusieurs milliers ; on peut s'en faire une idée approximative d'après les chiffres de vente du projecteur Mangin (2 800 exemplaires) et du projecteur parabolique Schuckert (300 exemplaires); ces chiffres, comptés depuis 1887 seulement, sans parler des réflecteurs lenticulaires et autres, montrent tout l'intérêt qui s'attache à cette question.

un parallélisme suffisant. Son appareil était inaltérable, mais trop coûteux et d'un maniement trop délicat.

C'est pour remédier à ces inconvénients, qui s'exagèrent dès que la lentille atteint certaines dimensions, que M. le colonel Mangin a créé ses miroirs aplanétiques. On sait que le miroir Mangin est formé d'une glace taillée sur ses deux faces suivant deux sphères de rayons inégaux, et argentée sur sa face convexe. Les rayons envoyés par la source lumineuse placée du côté de la concavité du miroir sont réfléchis sur la face argentée et sortent après avoir subi une double réfraction. Le colonel Mangin a déterminé les relations qui doivent exister entre les rayons des deux sphères, l'indice de réfraction du crown employé, et l'épaisseur minima du miroir pour que les rayons incidents sortent suivant des directions sensiblement parallèles à l'axe optique.

Le miroir Mangin, qui est, grâce à la courbure différente de ses deux faces, un moyen extrêmement ingénieux d'obtenir le parallélisme des rayons émis par une source lumineuse, est employé concurremment au miroir parabolique, qui, géométriquement, est le seul miroir qui résoudrait le problème si la source lumineuse était réduite à un point.

109. — Situation actuelle des phares en France. — Le nombre total des phares électriques construits, en comptant ceux qui sont en cours d'exécution, sera de treize. Les phares électriques sont des phares de grand atterrage. On a reconnu en effet par de nombreuses expériences que l'électricité donnait une puissance incomparablement plus grande que l'éclairage à l'huile. Les phares électriques sont donc destinés à remplacer les phares de leur ordre à l'huile. Quoique ces

derniers soient au nombre d'une cinquantaine en France, il n'est pas possible jusqu'à présent d'y substituer partout l'électricité : les raisons budgétaires s'y opposent. De toute manière, on ne dépassera pas, comme nombre de phares électriques, le nombre actuel de phares de leur ordre à l'huile minérale. Il est à présumer que, d'ici longtemps, on s'en tiendra au nombre de treize que nous venons de citer. La France se trouve, en effet, de beaucoup la nation qui possède le plus de phares électriques. L'Angleterre en a quatre seulement.

CHAPITRE VI

STRASS. — ÉMAIL. — VERRES COLORÉS MOSAÏQUE. — VITRAUX

§ 1. — Strass

110. — Fabrication et composition. — Le strass est un verre plombeux plus riche en oxyde de plomb que le cristal, très dense, dont la joaillerie fait usage pour l'imitation des pierres précieuses.

On est arrivé à en faire des imitations si parfaites au point de vue de la coloration et de la limpidité, que la densité et la dureté sont les seuls moyens dont on dispose pour distinguer les produits artificiels des pierres naturelles.

Le strass incolore se rapproche beaucoup du flint-glass et est employé pour imiter les diamants. Il est préparé avec des matières d'une pureté irréprochable qui sont fondues, puis refroidies très lentement.

M. Donault, qui s'est occupé particulièrement de la

fabrication du strass, a indiqué les dosages suivants :

Cristal de roche. . .	300	»	300
Sable	»	300	»
Minium	470	»	461
Céruse.	»	514	»
Potasse pure.	163	96	168
Borax	22	27	18
Acide arsénieux . . .	1	1	05

Ce qui donne la composition moyenne :

Silice	31,2
Alumine	1,0
Oxyde de plomb.	53,0
Potasse.	12,0
Borax.	2,8
Acide arsénieux	traces.

Le cristal de roche donne un verre plus dur que le sable et d'une blancheur telle qu'on peut presque la lui reprocher comme un défaut. En effet, le strass au cristal de roche jette moins de feu que celui qui est légèrement jaune.

Les pierres artificielles colorées ont toutes le strass pour base. On les obtient en faisant fondre le strass incolore avec des oxydes métalliques. Nous donnons ci-dessous la composition de quelques pierres précieuses artificielles :

Topaze . . .	Strass incolore.	1,000	1,000
	Verre d'antimoine . . .	40	»
	Pourpre de Cassius . .	1	»
	Oxyde de fer.	»	10

Cette pierre présente quelquefois pendant sa fabrication de remarquables changements de teinte : elle peut

passer du jaune au rouge rubis, suivant la température et la durée du feu.

On obtient le rubis en fondant pendant trois heures une partie de matière topaze avec huit parties de strass incolore ; en réchauffant ensuite la masse vitreuse au chalumeau, on lui voit prendre une belle teinte rouge.

Émeraude	Strass incolore	1,000
	Oxyde de cuivre pur	8
	Oxyde de chrome	0,2
Saphyr	Strass incolore	1,000
	Oxyde de cobalt	15
Aigue-marine	Strass incolore	1,000
	Verre d'antimoine	7
	Oxyde de cobalt	0,4
Grenat syrien	Strass incolore	1,000
	Verre d'antimoine	500
	Pourpre de Cassius	4
	Oxyde de manganèse	4

Si, au lieu de l'oxyde de plomb, ou en même temps que ce dernier, on employait l'oxyde de bismuth, l'oxyde de zinc, le carbonate de baryte ou de strontium avec des silicates et des borates, ainsi que des phosphates et des fluorures métalliques, on obtiendrait certainement des variétés diverses susceptibles d'être utilisées avec avantage [1].

§ 2. — **Émail**

Dans l'origine, on ne se servait que d'émail blanc, en couverte sur les objets de poterie.

[1] Pour la taille et le poli des pierres précieuses, on consultera avec intérêt *l'Art des lapidaires*.

Actuellement on appelle émail toute matière vitreuse, transparente ou opaque, colorée ou incolore, qui sert à recouvrir les corps. Il y a à considérer les émaux opaques et les émaux transparents. Les uns et les autres peuvent être colorés par les oxydes métalliques.

L'acide stannique, l'acide arsénieux, l'antimoniate d'antimoine, le phosphate de chaux, les chlorures de plomb et de zinc produisent un verre opaque par leur incorporation dans un verre plombeux.

A l'exception de l'acide stannique, ces corps ne donnent d'opacité qu'autant que le verre est refroidi ; à l'état fluide, le verre est transparent, de même qu'il est également transparent, mais seulement après refroidissement, si le verre a été, pendant longtemps, maintenu à une température très élevée.

Employés en faible quantité, les corps ci-dessus désignés donnent un verre d'opacité atténuée, rougeâtre par transparence, analogue à l'opale naturelle dont ils ont pris le nom.

L'alumine et l'oxyde de zinc incorporés dans les verres et les émaux donnent des propriétés de coloration et d'opalisation toutes spéciales.

111. — Composition d'émaux non colorés. — Les fluorures de calcium, de sodium et d'aluminium (cryolithe) donnent, suivant la dose, un émail ou un verre opale ; avec addition de feldspath, l'opacité est accentuée.

Si on mélange une partie de cryolithe avec une, deux, trois parties de sable, on obtient des produits identiques entre eux comme aspect laiteux et comme propriétés ; ils ont l'apparence du marbre ; avec quatre ou cinq parties de sable, les produits ont encore l'aspect laiteux, mais ils

ressemblent davantage à un verre. La dureté, la ténacité augmentent d'ailleurs avec la teneur en sable ; par contre, la fusibilité diminue.

La cryolithe est un fluorure double d'aluminium et de sodium dont l'action sur la silice peut être représentée par la formule :

$$3NaFl, Al^2Fl^3 = 3SiO^3 = 2SiFl^3 + 3NaOAl^2O^3SiO^3$$

Sa propriété opacifiante semble être due à l'alumine qu'elle contient.

L'opalescence est souvent communiquée au verre par addition de phosphate de chaux.

Nous donnons ci-dessous deux compositions : l'une d'un émail opale, l'autre d'un verre dit pâte de riz, qu'on emploie pour la fabrication d'abat-jour.

Émail opale

Sable.	100
Minium.	66
$KOCO^2$.	33
Os calcinés et pulvérisés . .	18
MnO^2.	0,1

Pâte de riz

Sable.	100
$KOCO^2$.	43
Phosphate de chaux	5
Azotate de potasse.	4

Si à cette composition on ajoute quatre parties de fluorure de calcium on obtient un verre qui laisse tamiser la lumière en blanc.

On a quelquefois recours, pour obtenir une légère opacité d'un verre blanc, à une addition de ce même verre

faite tardivement. C'est ainsi qu'on fabrique, en Bohême et en Sibérie, un verre blanc laiteux dit verre d'albâtre.

La composition de ce produit ne diffère pas de celle du verre de Bohême. On l'obtient en ajoutant à du verre fondu et affiné une certaine quantité du même verre froid et en menus fragments. Aussitôt que la fusion en est terminée, on travaille le verre, qui est alors d'un blanc laiteux, tandis qu'il serait redevenu incolore et transparent par un séjour plus prolongé au four.

On a fréquemment recours au même expédient dans la fabrication du verre coloré. Si on ajoute de l'oxyde ou du sulfate de cuivre à un verre incolore et que la température soit maintenue pendant un temps suffisamment long, on obtient un verre transparent d'un vert bleuâtre. Si, au contraire, l'opération est conduite comme nous l'avons indiqué plus haut, de manière à obtenir un verre laiteux, ce verre sera coloré en bleu turquoise. Enfin, si ce dernier verre est refondu à une température élevée, on obtient un verre bleu transparent couleur d'aigue-marine.

Voici quelques compositions d'émaux non colorés :

Sable siliceux	100
Calcine à 15 0/0 d'étain . . .	200
Carbonate de potasse	80

La calcine est obtenue en oxydant, dans un courant d'air, un alliage composé de :

Plomb	100
Étain.	15

Les trois compositions ci-dessous donnent également

un très bel émail :

Quartz pulvérisé	10
Minium	14
Nitrate de potasse	3
Soude d'Espagne	2
Arsenic	1
Cinabre naturel	1
Verre de Bohême	3

Verre blanc	300
Borax	100
Nitrate de potasse	25
Antimoine diaphorétique	100

Groisil de cristal	720
Minium	20
Borax cristallisé	40
Nitrate de potasse	40
Acide arsénieux	60

D'une manière générale, les émaux transparents ou opaques peuvent être appliqués sur toutes les matières susceptibles de supporter sans se brûler, sans fondre ou sans éclater, la chaleur nécessaire pour les faire entrer en fusion. Ces matières sont la terre (faïence, grès ou porcelaine), le verre, la lave et les métaux, principalement l'or, l'argent, le cuivre et le fer ; mais il faut, sous peine d'accidents irréparables, que leur composition soit en rapport de dilatation avec la matière qui est appelée à les recevoir.

Une application industrielle importante est celle qui consiste à recouvrir, à protéger, à l'aide d'un émail, les objets en fer ou en fonte.

L'application de l'émail sur les différentes matières que nous venons d'énumérer a reçu le nom général d'émaillage ; mais on réserve exclusivement le nom d'émaillerie à l'art d'émailler les métaux, et, par métonymie, on

donne le nom d'émail à tout objet en métal recouvert, en totalité ou en partie, d'émail; on dit : un émail byzantin, un émail de Limoges, un émail de Petitot, etc.

Sur les métaux, l'application de l'émail se fait de quatre façons différentes : dans la première, l'émail incrusté dans le métal n'est, pour ainsi dire, que l'accessoire de la décoration dont les contours ou le dessin sont formés par le métal lui-même; dans la seconde, il couvre entièrement la partie du métal qui est décorée : dans ce cas, il est translucide, et la décoration gravée en relief sur le fond même du métal apparaît sous l'émail; dans la troisième, c'est l'émail lui-même, couvrant le métal en totalité qui, par opposition de tons, ou seulement même de valeur de ton, forme la décoration peinte, et alors le métal sert simplement d'excipient, absolument comme la toile, le bois ou le papier dans la peinture à l'huile ou à l'aquarelle; dans la quatrième enfin, employée particulièrement dans la joaillerie et la bijouterie, l'émail appliqué sur certaines parties du métal n'est là que pour en rehausser l'éclat par sa couleur.

De ces quatre applications de l'émail, les trois premières correspondent à trois époques bien distinctes : les émaux incrustés ont été employés dans l'antiquité, et surtout au moyen âge, jusqu'au XIVe siècle; les émaux translucides ont été en usage au XIVe et pendant une partie du XVe siècle; les émaux peints datent de la fin du XVe siècle et sont restés en vogue jusqu'à la fin du XVIIIe, mais en subissant une transformation.

112. — Émaux incrustés. — Les procédés employés dans l'incrustation des émaux sont de deux sortes: le plus ancien est celui qui consiste à remplir d'émail une cavité formée par le creusement ou champlevage

partiel du métal qui sert d'excipient; ce champlevage est fait de façon que les parties creusées ainsi dans l'épaisseur du métal, suivant un dessin tracé à l'avance, soient reliées ensemble par des arêtes plus ou moins larges, constituant autant de petites caisses destinées à recevoir des pâtes d'émail de couleurs différentes ; après le passage au feu, les émaux sont usés et polis de manière à venir affleurer le métal et à former avec lui une surface plane et bien unie. Ce procédé, connu dans l'antiquité, a été repris au XIe siècle ; nous verrons plus loin qu'il a subi plusieurs modifications, ou du moins qu'il a été employé de façon à donner des résultats variés, bien que le principe soit resté toujours le même. Les objets ainsi décorés sont généralement en cuivre ou en bronze ; on les distingue sous le nom d'*émaux champlevés*.

Dans l'autre procédé, qui était également connu dans l'antiquité, mais que les Byzantins ont remis en pratique dès le VIe siècle, les pâtes de différentes couleurs sont enserrées entre des cloisons formées par de petites lames extrêmement minces de métal, placées sur champ et contournées suivant les traits intérieurs et extérieurs du dessin quelquefois assez compliqué, qui doit être émaillé ; ces lamelles, soudées sur le fond, permettent d'isoler les différentes couleurs d'émail dont on remplit leurs intervalles. Ce procédé, qui a été employé presque exclusivement sur des plaques d'or destinées à rehausser par leur richesse et l'éclat chatoyant de leurs couleurs les couronnes et les ornements royaux, les autels et les objets destinés au culte, les plaques d'évangéliaires, etc., a reçu le nom d'*émail cloisonné*.

En Allemagne et particulièrement dans les ateliers des bords du Rhin, on a quelquefois associé les deux procédés du cloisonnage et du champlevage sur des émaux

généralement en cuivre, qui prennent alors le nom d'*émaux mixtes*.

113. — Émaux translucides. — Les émaux sont dits translucides sur relief ou de basse-taille [1] lorsque la surface du métal a été gravée en creux de façon à former une sorte de bas-relief recouvert entièrement d'émaux transparents, dont la coloration augmente d'intensité selon qu'ils se trouvent sur des parties creusées plus ou moins profondément. Ce procédé, beaucoup plus artistique que les précédents, a été appliqué sur des objets et des plaques d'or ou d'argent, d'assez petite dimension généralement; suivant toute probabilité, il a été trouvé en Italie tout à la fin du XIIIe siècle et a été pratiqué un peu partout, mais particulièrement en France et en Allemagne, au XIVe et au XVe siècle.

114. — Émaux peints. — On appelle généralement émaux peints ceux dont le métal, qui sert d'excipient, est recouvert en son entier d'une couche d'émail qui peut être décoré suivant divers procédés qui donnent des résultats assez différents les uns des autres. Au XVIe siècle, on se servait pour les fonds, d'un émail noir, brun ou bleu foncé, sur lequel la décoration, figures ou ornements en émail blanc, se modelait par transparence, suivant le degré d'épaisseur de cet émail sur le fond; c'est le procédé qui, à cette époque, était particulier à Limoges, et que l'on

[1] On les désignait ainsi dès le commencement du XVIe siècle, probablement pour les distinguer des émaux peints récemment inventés. « Un calice (don de Charles V), émaillé de basse-taille, champ d'azur, etc. (*Invent. de l'église Saint-Denis*, 1534.) — Un petit tableau d'or, en forme de table d'autel, fermant à deux ouvrants, au milieu duquel est, en émaillure de basse-taille, le crucifiement. » (*Invent. de Charles-Quint*, 1536.)

désigne sous le nom d'émail limousin ou genre limousin. Au XVII[e] siècle, on remplaça le fond coloré par un fond entièrement blanc sur lequel on peignait avec des couleurs variées ; ce genre, qui dans son procédé d'exécution et dans ses résultats se rapproche de la peinture sur porcelaine, a reçu plus particulièrement le nom d'*émail des peintres*.

115. — Émaillage des métaux communs. — L'application des émaux sur les métaux communs doit répondre au double but de protéger la surface de l'objet contre l'oxydation et en même temps de concourir à la décoration.

Émaillage de la tôle. — La tôle est bien décapée dans une solution étendue et chaude d'acide sulfurique. Après séchage on en saupoudre la surface avec un émail transparent assez fusible dit « contre-oxyde », dont on opère la fusion en portant l'objet au moufle. L'émail véritable est ensuite fixé sur ce contre-oxyde.

Fonte moulée émaillée. — Le principal représentant de cette industrie est M. Godin-Lemaire, à Guise (Aisne). Il avait d'abord essayé d'opérer comme pour la tôle, mais il dut renoncer à cette manière de faire, car le contre-oxyde s'écaillait, se soulevait, par suite de la combustion du carbone contenu dans la fonte. Il ne put réussir qu'en portant l'objet au rouge et en le saupoudrant, seulement à ce moment, d'un émail très fusible dont la fusion est ensuite complétée au four.

Emaillage intérieur des objets de cuisine. — L'émail n'est pas appliqué directement sur le métal, mais bien

sur un enduit dont on recouvre au préalable l'intérieur de l'objet.

Cet enduit s'obtient en fondant ensemble un mélange de sable, de terre de pipe, de carbonate de soude et de borax. Avec cette sorte de verre réduit en poudre impalpable et gâché clair avec de l'eau, on fait une barbotine qu'on verse dans l'intérieur de l'objet à émailler. On fait écouler l'excès et on sèche à l'étuve pendant vingt-quatre heures. On porte alors au moufle pour amener la fusion et l'adhésion de l'enduit. C'est cette poterie intérieure qui est ensuite recouverte d'une barbotine d'émail qu'on cuit comme précédemment.

116. — Verre émaillé. — Sur l'objet à émailler on dispose une barbotine d'émail faite à l'eau gommée ; après dessiccation on cuit après avoir enlevé l'émail aux endroits qui doivent rester transparents. Pour la fabrication industrielle d'objets en verre émaillés avec réserve de parties claires, on procède d'une façon plus rapide à l'enlevage de l'émail. On se sert d'un pochoir qui est constitué par une feuille de cuivre découpée suivant le dessin. Quand l'émail a été appliqué avec l'eau gommée, on place le pochoir sur la feuille ou l'objet en verre, et on frotte ensuite avec une brosse. L'émail se trouve enlevé là où le pochoir est vide ; on a un dessin transparent sur fond mat.

Pour de grandes feuilles, on déplace le pochoir en en fixant la position par des points de repère.

Émaillage avec dentelle. — On met une couche d'eau gommée sur la lame de verre ; on sèche et on dépose sur cette lame un carré de dentelle représentant le dessin

qu'on veut obtenir. Cette dentelle est maintenue par un cadre dont elle forme le fond.

On place le tout dans une cage fermée dans laquelle on injecte de la poussière d'émail, qui tombe peu à peu et s'applique aux endroits non recouverts par la dentelle. On enlève ensuite cette dernière, et on porte la lame de verre dans une étuve où passe de la vapeur d'eau qui, délayant la gomme, rend l'émail adhérent. On peut alors facilement transporter la plaque de verre au moufle sans craindre de gâter le dessin.

On a fait aussi des reproductions d'émaux anciens en choisissant comme supports des verres de qualité inférieure, car les verres ordinaires sont trop beaux et laissent trop facilement passer la lumière.

§ 3. — Verres et cristaux colorés

La coloration des verres est obtenue, comme nous avons déjà eu l'occasion de le dire, par addition d'oxydes métalliques qui très fréquemment sont ajoutés au mélange des matières vitrifiables. On obtient ainsi du premier jet un verre coloré.

Dans d'autres cas, on refond du verre blanc avec la quantité convenable d'oxydes métalliques.

La fabrication des cristaux colorés n'est pas ancienne en France, où elle n'était guère pratiquée avant 1840.

Certaines matières colorantes ne peuvent s'allier au cristal seul, il faut alors lui adjoindre soit du verre de Bohême, soit du verre ordinaire à base de soude.

Nous donnons ci-dessous la composition de quelques verres colorés.

117. — Verre bleu.

Verre blanc ordinaire . .	100 kil.
Oxyde de cobalt	150 gr.

ou l'équivalent en « safré » ou « azur ».

On donne ces noms à des verres bleus très foncés en couleur, fabriqués spécialement en vue de permettre d'obtenir plus aisément des verres à teinte bleue très faible, par la fusion d'une plus ou moins grande proportion de ces verres avec du verre blanc.

Bleu turquoise. — Il faut un verre très riche en silice dans lequel on ajoute des battitures de cuivre ou de l'oxyde de cuivre précipité.

Sable	100
Carbonate de soude . . .	40
Carbonate de potasse . .	5
Carbonate de chaux . . .	20
Battitures de cuivre . . .	10
Protoxyde d'étain	0,5

Par transparence, le verre coloré à l'oxyde de cobalt est rougeâtre, ce qui le rend impropre à la fabrication d'écrans. Pour obtenir une teinte neutre, il convient d'ajouter un peu d'oxyde de fer à l'oxyde de cobalt employé comme colorant.

Voici deux compositions qui donnent un bon verre neutre; le n° 1 est employé pour écrans destinés à l'examen des fours; le n° 2 peut servir à fabriquer des lunettes, ce verre peut même remplacer les verres dits « verres fumés ».

	I	II
Sable.	300	300
Carbonate de soude	100	100
Carbonate de chaux	50	50
Oxyde de fer des battitures .	10	30
Oxyde de cobalt	0,300	1

118. — Verres verts. — Il semblerait que la coloration verte soit une de celles qui sont le plus facile à obtenir, puisqu'elle se manifeste, à un degré plus ou moins élevé, dans la fabrication de tous les verres blancs.

Il n'en est rien cependant, et on éprouve, au contraire, les plus grandes difficultés à préparer un verre d'une belle teinte verte franche et régulière, surtout si l'on opère en pots découverts, car dans ce cas il est difficile d'éviter la réduction partielle des sels de cuivre qui entrent dans la constitution de ces verres.

Voici des compositions qui donnent de bons résultats :

	Pots découverts		Pots couverts
Sable	100	260	100
Carbonate de soude . .	30	110	»
Carbonate de chaux. . .	23	55	»
Carbonate de potasse . .	»	»	»
Minium	»	»	120
Nitrate de potasse. . . .	7	»	»
Nitrate de soude	»	0,500	»
Oxyde noir de cuivre . .	5	0,500	11
Oxyde de fer	3	»	4
Bichromate de potasse .	3,5	1	1,8

On obtient un verre vert très foncé en fondant :

Verre blanc	100 kil.
Oxyde noir de cuivre	250 gr.
Oxyde de chrome ou équivalent en bichromate de potasse	100 à 150 gr.

Le réchauffage des verres verts, de même d'ailleurs que celui de tous les verres colorés, demande à être conduit convenablement si l'on veut que le verre reste transparent. On voit, en effet, quelquefois se produire, pendant la recuisson des verres fort chargés en oxyde, la séparation d'une quantité plus ou moins considérable de ces oxydes, ce qui produit des verres plus ou moins opaques à veines colorées.

On a utilisé cette propriété pour obtenir la reproduction de certains produits naturels. C'est ainsi que la malachite est imitée par un verre tenant en suspension dans sa masse du cuivre à divers degrés d'oxydation.

On obtient un verre d'une couleur émeraude en alliant le bioxyde de cuivre à l'urane; la teinte verte résulte de l'union de la couleur jaune donnée par l'urane avec la couleur bleue du bioxyde de cuivre.

Les verres à l'urane présentent un double reflet : ils sont dichroïques. L'urane ne peut être alliée aux verres plombeux, mais elle réussit fort bien avec les verres à base de potasse.

La composition ci-dessous est fréquemment employée :

Sable.	100
Carbonate de potasse.	38
Chaux éteinte	18
Nitrate de potasse . . .	5
Urane.	2,5

119. — Verres violets. — Ils sont tous obtenus avec l'oxyde de manganèse qu'on maintient au maximum d'oxydation par addition de nitrate de potasse.

On compose généralement :

Sable	100	100	260	100
Carbonate de soude	»	30	110	»
Carbonate de potasse	36	»	»	20
Minium	10	2	»	90
Carbonate de chaux	20	20	55	»
Nitrate de soude	»	2	0,500	»
Nitrate de potasse	5	»	»	12
Peroxyde de manganèse	6 à 8	10	4	22
Groisil	»	100	100	»

On obtient un très beau violet améthyste en fondant :

Verre blanc	100
Bioxyde de manganèse	2 à 2,500
Nitrate de potasse	4 à 4,500

120. — Verres jaunes. — On les obtient de différentes façons. Ceux qui sont colorés dans leur masse sont préparés en ajoutant du soufre ou du charbon à du verre blanc fondu. Avec 2 0/0 de soufre on obtient un très beau jaune.

Voici d'ailleurs quelques compositions :

Sable	150	150
$KOCO^2$	20	75
CaO éteinte	18	38
Écorce de bouleau	4,5	»
Soufre en fleur	»	2,100

Le verre à la soude se colore également, mais la teinte est moins belle qu'avec le verre à la potasse. En employant du charbon de bois blanc : bouleau ou peu-

plier, on obtient un beau jaune avec les deux compositions :

Sable	100	130
$NaOCO^2$ . . .	45	55
$CaOCO^2$ . . .	35 à 40	27
Charbon. . . .	4	1 à 15

Jaune par cémentation. — Nous avons dit que le verre pouvait se colorer par une action réductrice prolongée s'exerçant à sa surface. On utilise quelquefois cette propriété pour lui communiquer une teinte jaune superficielle.

A cet effet, la feuille de verre blanc est enduite d'une barbotine formée en délayant dans l'eau une poudre provenant de la fusion de :

Argent fin	1
Régule d'antimoine.	1
Oxyde de fer.	3

poudre à laquelle on ajoute de l'oxyde de fer en quantité telle que, pour une partie d'argent, il y ait dix parties d'oxyde de fer.

Après dessiccation on porte au moufle pendant un quart d'heure; on brasse ensuite pour mettre le verre à nu.

L'oxyde de fer agit ici simplement en jouant le rôle de médium, de véhicule à la matière colorante. Son mode d'action est le même avec la composition suivante dont on peut encore faire usage :

Chlorure d'argent . .	2 à 25
Oxyde de fer	10
Sulfure de cuivre . . .	0,5
Acide stannique. . . .	1

On a remarqué que les verres qui sont les plus susceptibles de prendre le jaune sont ceux qui contiennent de l'arsenic ou du Na Cl.

Préparation des verres teintés jaunes et rouges. — D'après M. Scola, on prépare une dissolution de 6 grammes de gélatine, 1 gramme de nitrate d'argent et 100 grammes d'eau ; on étend ce mélange sur des verres qu'on laisse sécher dans l'obscurité ; on expose ensuite ces verres à la lumière pendant un temps suffisant pour réduire le sel d'argent contenu dans la gélatine, et l'on voit alors se développer une teinte d'un beau jaune clair.

Si l'on prend 2 grammes de nitrate d'argent, la couleur finale peut être d'un jaune foncé.

Si le mélange contient 4 grammes de la même substance, on obtient le rouge foncé et même le brun rouge.

Quand des verres sont préparés avec la solution à 4 0/0 de nitrate, séchés, conservés dans l'obscurité pendant huit jours, puis lavés soigneusement, séchés dans l'obscurité, et enfin exposés au soleil, la gélatine n'offre pas la moindre coloration.

Quand les verres recouverts du mélange à 4 0/0 sont encore humides, exposés à l'action de la lumière, la réduction est tellement complète que la surface gélatinée prend tout à fait l'aspect d'un miroir métallique imparfait. Il est assez curieux que l'argent puisse servir à se défendre lui-même de l'action de la lumière, car la coloration rouge produite est la même que le rouge rubis employé dans ce but.

On pourra peut-être utiliser les réactions mentionnées ci-dessus. En tout cas, c'est un moyen d'obtenir des verres jaunes ou rouges à bon marché.

121. — Verres rouges. — On emploie principalement pour cette fabrication les sels de protoxyde de cuivre. Comme il est nécessaire que le cuivre ne passe pas à un état supérieur d'oxydation, on prend la précaution d'ajouter un peu d'étain ou de fer, qui attirent à eux l'oxygène.

Pour avoir le rouge au cuivre destiné à doubler le cristal, on ajoute 25 0/0 de verre blanc au mélange ci-dessous en fusion :

Sable	25
Minium	50
Oxyde de cuivre	1.20
Étain	3

Ce verre étant fondu, mâclé, coulé et broyé, on le refond et le mâcle ainsi trois fois de suite. Au second coulage, il est d'un jaune clair, au troisième il est d'un jaune orangé avec quelques parties d'un jaune transparent.

On le fond alors avec vingt-cinq parties d'un verre blanc composé de :

Sable	100
Carbonate de potasse	36
Chaux	18
Minium	3

Le nouveau verre obtenu, refondu avec du tartre ou des copeaux d'étain, produit un très beau rouge.

Verres rouges par cémentation. — Le rubis peut être obtenu par cémentation en prenant :

Oxyde de cuivre	4
Écailles de fer	2
Ocre jaune	4 (qui sert de véhicule)

On opère comme pour le verre jaune ; la première chauffe au moufle donne un verre noir ; on procède alors à une seconde chauffe en entourant l'objet de charbon de bois qui ramène le cuivre au minimum.

On produit un beau verre rouge par le mélange des substances suivantes :

Sable finement pulvérisé.	2000	parties
Oxyde rouge de plomb, minium . . .	400	—
Carbonate de potasse	600	—
Chaux	100	—
Phosphate de chaux	20	—
Crème de tartre	20	—
Borate de soude	30	—
Oxyde rouge et protoxyde de cuivre.	9	—
Bioxyde d'étain.	13	—

La fusion de ce mélange donne un verre rouge transparent, d'excellente qualité, qui peut servir directement à la confection des objets les plus variés, à moins qu'il ne soit nécessaire de le soumettre à une seconde fusion, pour obtenir une couleur plus intense.

122. — Verre rouge à l'or. — On a cru pendant longtemps qu'il était impossible de préparer du verre rouge à l'or autrement qu'avec le pourpre de Cassius.

On employait alors :

Groisil de cristal	300
Minium	15
Pourpre de Cassius.	0,25
Antimoniate de potasse. . .	3

Mais Fuss a montré qu'on obtient un verre rubis tout aussi bon en faisant usage du chlorure d'or, dont la teneur

dans le verre ne doit pas être supérieure à 1/1000. On arrose le sable avec la solution de chlorure d'or, on le sèche et on le fait entrer ensuite dans les compositions vitrifiables.

Si le verre ainsi obtenu est refroidi rapidement, il est incolore tout comme le verre au protoxyde de cuivre. Si on le recuit doucement, sans atteindre la température de ramollissement du verre, la magnifique couleur rouge rubis apparaît subitement.

S'il y a trop d'or, une partie se précipite et on a des verres chatoyants.

Le verre rose appelé rubis de Bohême s'obtient en fondant le mélange :

Quartz étonné et pulvérisé. . . .	100
Minium.	150
Potasse fine	30
Borax fondu.	20
	5
Peroxyde de manganèse.	5
Or détonant broyé avec de l'essence de térébenthine . .	5

Les verres colorés à l'or contiennent tellement peu de ce métal qu'on a songé à en faire un réactif pour déceler la présence de l'or dans les roches où on en soupçonne la présence en quantité trop faible pour être déterminée par l'analyse chimique.

Le verre rose à l'or peut, d'après Péligot, être également obtenu au moyen de la dissolution d'or dans l'eau régale, qu'on mélange avec le produit qui résulte de l'action de l'acide azotique sur l'étain. Les deux liqueurs sont versées sur le sable, comme il a été dit plus haut. On se sert aussi, pour le même objet, du pourpre de Cassius.

Lorsque le cristal à l'or est longuement chauffé, il prend d'abord la couleur rouge, puis se décolore partiellement et présente après refroidissement une teinte bleuâtre avec des paillettes très fines d'or brillant. Ce verre est quelquefois employé, sous cet état, en bijouterie.

La fabrication des pièces colorées en rose ou rouge groseille exige des soins particuliers. On introduit la composition à l'or entre deux couches de cristal incolore, ce qui, pendant le travail de la pièce, garantit le verre à l'or et empêche la formation de paillettes métalliques.

Pour les autres verres doublés, on introduit, dans une paraison de verre à l'or amenée à l'état de cône creux, une certaine quantité de cristal incolore ; quand l'adhérence est produite, on réchauffe à l'ouvreau pour répartir uniformément le verre coloré à la surface du verre blanc. La pièce ainsi doublée est terminée par les moyens ordinaires.

Pour le verre doublé, on fait souvent usage, en pots couverts, de la composition ci-après qui donne de très bons résultats :

Cristal blanc (en fragments). . .	100
Minium.	15
Salpêtre	3
Pourpre de Cassius	0,25
Antimoniate de potasse	3

Le verre qu'on obtient paraît d'abord blanc et ce n'est qu'au réchauffage qu'on lui voit prendre la couleur rouge. Ce verre se travaille en doublé ; mais, comme il est d'un prix élevé, on cherche à l'employer sans perte, et pour cela on évite de le prendre à la canne.

On le prépare sous forme de cylindres ayant 12 à

15 centimètres de longueur et 4 à 5 millimètres de diamètre. Pour l'employer, on fait chauffer dans une arche le nombre de bâtons présumés nécessaires pour un travail. Un gamin prend un de ces bâtons sur un pontil à l'extrémité duquel il a cueilli un peu de verre chaud, puis il vient l'appliquer sur la première paraison qu'un ouvrier a cueillie à la canne.

L'ouvrier coupe, à l'aide de pinces, le bâton de verre coloré, de façon à ne prendre de ce verre que la quantité qu'il juge nécessaire ; le reste est reporté au four par le gamin.

Réchauffant alors sa canne, afin d'assurer la bonne répartition du verre coloré, l'ouvrier va ensuite cueillir, par dessus, la quantité de verre incolore nécessaire à la confection de l'objet.

C'est par un procédé analogue qu'on obtient des objets à dessins colorés sur verre clair. Pour cette fabrication, on cueille une paraison en verre clair qu'on recouvre ensuite par un cueillage de verre coloré. Après avoir travaillé, marbré la masse, on l'introduit dans un moule présentant en relief dans l'intérieur les dessins que l'on veut obtenir.

Par soufflage, on donne à la pièce la forme du moule. Il ne reste plus ensuite qu'à enlever à la roue le verre qui fait saillie, de façon à mettre à découvert, en ces points, le verre blanc.

On peut encore obtenir un beau verre rouge en fondant les compositions ci-dessous :

Sable.	100	100	100
Potasse.	48	35	30
Chaux éteinte à l'air.	8	»	»
Pourpre de Cassius.	6	8	12
Oxyde de manganèse.	4	4	6

Nitrate de potasse. .	»	7	5
Sulfure d'antimoine.	»	4	6
Minium.	»	78	60

On peut résumer comme suit la question du verre à l'or :

1° Pour préparer un verre coloré en rouge par de l'or, il n'est pas nécessaire d'employer du pourpre de Cassius ou d'ajouter au chlorure d'or de l'oxyde d'étain ou de l'oxyde d'antimoine ;

2° On peut par l'addition de chlorure d'or ou même d'or métallique très divisé, soit à un verre plombeux très fusible, soit à un verre de potasse ne renfermant que très peu de minium, obtenir un verre qui se colore en rouge pendant le travail ;

3° Si l'on emploie du pourpre de Cassius, ce dernier est décomposé pendant la fusion du verre, et il s'en sépare de l'or métallique ;

4° En porphyrisant de l'or métallique en poudre fine avec des substances dures et pulvérulentes, on obtient des mélanges colorés en rouge ;

5° La coloration du verre paraît due, selon toutes probabilités, à de l'or très divisé.

Plusieurs autres corps métalliques présentent des phénomènes de coloration analogues. Le platine et l'iridium en poudre, mélangés avec de l'émail, donnent une belle couleur noire non métallique. L'argent colore les verres en jaune transparent, s'ils sont vus par réfraction, et en vert bleu grisâtre, si on les examine par réflexion.

Lorsque ces verres sont réchauffés un trop grand nombre de fois, ils deviennent laiteux et on y distingue des petits grains d'argent, phénomène absolument identique à celui produit par l'or.

Enfin, les changements de couleur produits par les

changements d'état moléculaire de l'iodure de mercure, du carbone, du soufre, du sélénium, du phosphore, du mercure, de l'oxyde de fer, etc., et les anneaux colorés, prouvent que rien ne s'oppose à ce que l'or présente les mêmes phénomènes.

123. — Verres roses au sélénium. — Les procédés suivants brevetés par M. Franz Welz permettent d'obtenir des verres de couleur rose et rouge orangé.

Le rose s'obtient en ajoutant du sélénium au verre blanc en fusion ; la coloration varie d'intensité, pour une composition donnée de verre, avec la quantité de sélénium ajoutée. D'autre part, à dose égale de colorant, l'intensité varie avec la nature de verre employé.

Si au sélénium on ajoute du sulfite de cadmium, la teinte devient rouge orangé, la nuance orangée s'accentuant avec la dose de sulfite de cadmium.

124. — Verre noir ou hyalithe. — On l'obtient en faisant fondre avec du verre ordinaire des os calcinés, des scories de forge, des basaltes, des laves, du poussier de charbon, etc.

Les compositions suivantes donnent un verre noir très remarquable, excessivement dur, permettant d'imiter le marbre noir :

Verre au carbonate

Sable	300	250	250	250
Carbonate de soude . . .	100	100	100	100
Carbonate de chaux . . .	45 à 50	50	50	50
Battitures de fer	40 à 45	40	60	75
Oxyde de cobalt	»	1	1	4
Charbon	»	1	»	»

Verre noir au sulfate

Sable	250
Sulfate de soude	100
Carbonate de chaux	90
Pyrite grillée	40
Acide arsénieux	1
Charbon	7

Avec cette dernière composition, le verre obtenu en première fusion laisse beaucoup à désirer comme affinage ; mais, refondu à nouveau dans un creuset neuf, il s'affine parfaitement bien et donne un verre d'une très belle couleur noire.

125. — Fabrication des verres doublés. — Nous venons d'indiquer plus haut comment sont obtenus les verres doublés à l'or.

Pour les autres verres, beaucoup moins coûteux, on fait usage d'un autre procédé qui consiste à cueillir d'abord une certaine quantité de verre coloré (400 gram. environ pour une feuille de 1 mètre carré et de 2 millimètres d'épaisseur) qu'on arrondit sur le marbre et qu'on recouvre ensuite par un nouveau cueillage de la quantité de verre blanc nécessaire à la confection de la pièce.

On continue le travail comme pour le verre à vitres, et on obtient finalement une feuille de verre dont une des surfaces est formée d'une couche de verre coloré.

Verre coloré plaqué sur verre blanc. — Le mode, ci-dessus décrit, de préparation des verres doublés ne permet pas d'obtenir des feuilles de dimensions considérables. En outre, si l'on veut obtenir des verres fortement colorés, on est amené à faire un fort cueillage de verre de couleur et, dans ce cas, on éprouve les plus grandes

difficultés pour obtenir l'uniformité de teinte sur toute la surface de la feuille.

La méthode suivante, d'une application peu coûteuse, supprime tous ces inconvénients et produit un verre coloré qui a partout la même épaisseur et la même intensité de coloration.

Les feuilles de verre à plaquer ou glacer sont recouvertes d'un enduit composé de trois parties de térébenthine et d'une partie de gomme-laque additionnée d'une petite quantité de glycérine, pour empêcher un séchage trop rapide. Elles sont ensuite placées sur un chariot qu'on introduit dans une caisse. Dans cette caisse on fait arriver un courant d'air chargé d'une poudre impalpable d'émail coloré. La couleur se dépose lentement et régulièrement sur les feuilles de verre ; en vertu de la pesanteur, les poussières les plus ténues tombent les dernières, produisant ainsi une couche très fine et parfaitement homogène. Quand le dépôt est terminé, on vide le chariot et on place les feuilles de verre dans une galerie de séchage d'où on les prend ensuite pour les passer dans un four spécial.

Ce mode d'opérer permet d'obtenir aisément toutes les colorations : notamment le jaune d'argent et le noir, si difficiles à produire jusqu'ici sur de grandes feuilles.

126. — Verres marbrés. — Ces verres, dont le fond peut être opaque ou transparent, s'obtiennent en mélangeant au moment de leur fabrication, par moulage ou soufflage, des verres de coloration différente, et plus généralement un verre incolore à un verre coloré.

On obtient un verre opaque veiné, marbré de bleu, en fondant :

D'une part :

Sable blanc.	900	N° 1
Cryolithe	300	

D'autre part :

Sable blanc.	900	
Cryolithe.	300	N° 2
Oxyde de cobalt	5	

Quand ces deux compositions sont devenues liquides, on verse le verre n° 2 dans le creuset contenant le verre n° 1, on brasse la masse pendant quelques instants, puis on coule le mélange dans des moules ou sur une table.

Si, au lieu de couler immédiatement le mélange des deux verres, on le laissait pendant quelque temps à la chaleur du jour, on obtiendrait un verre bleu beaucoup moins foncé.

Au lieu de veines bleues, on peut obtenir des veines violettes, en remplaçant l'oxyde de cobalt dans la composition n° 2 par 80 grammes de borate de manganèse ou 50 grammes de bioxyde de manganèse.

On produirait des veines vertes en employant 80 grammes de bichromate de potasse.

Verre marbré rouge au cuivre. — On opère comme il vient d'être dit le mélange des deux compositions suivantes :

Sable	260	260
Carbonate de soude	100	100
Carbonate de chaux. . . .	50	50
Battitures de fer.	15	»
Protoxyde de cuivre. . . .	»	10

L'addition d'oxyde de fer a pour but de maintenir le cuivre au minimum d'oxydation. On pourrait employer l'étain, mais il a l'inconvénient de donner de l'opacité.

Pour la préparation du verre marbré ci-dessus, on peut fondre ensemble les deux compositions dans le même creuset en ayant soin toutefois d'ajouter à la masse fondue, si la coloration vient à disparaître, une pincée de charbon de bois ou mieux des battitures de fer.

Le verre obtenu par ces procédés est d'un vert foncé, parsemé de larges veines d'un rouge pourpre. On en peut mouler des objets d'un très bel effet, des plaques qu'on substitue avec avantage au marbre pour les dessous de pendules, garnitures de cheminées, etc.

127. — Aventurines. — *Aventurine jaune.* — L'aventurine jaune est un verre qui contient, disséminés dans sa masse, des cristaux excessivement ténus de cuivre métallique et de silicate de cuivre.

Jusqu'en ces derniers temps, ce verre était exclusivement fabriqué à Murano par quelques verriers qui en gardaient jalousement le secret.

Grâce aux travaux de Frémy et Clémandot, on est arrivé à le produire très facilement en chauffant, en présence d'une masse vitreuse, un mélange de protoxyde de cuivre et de silicate de protoxyde de fer (ou simplement des battitures de fer au lieu de silicate).

D'après M. Hautefeuille, les cristaux triangulaires et hexagonaux qui se trouvent dans l'aventurine et qui lui donnent sa couleur jaune ne seraient pas du cuivre métallique, mais bien du silicate de protoxyde de cuivre.

Quoi qu'il en soit, ce verre est obtenu avec toutes les qualités que possède l'aventurine de Murano, en fondant

le mélange suivant :

Glace de Saint-Gobain. . .	2,000	
Nitrate de potasse	200	
Battitures de cuivre	125	
Peroxyde de fer.	60	(Hautefeuille)

Quand la fusion est complète, on ajoute 38 grammes de limaille de fer, on mâcle et on laisse refroidir très lentement.

Les deux compositions ci-dessus donnent également de bons résultats en présence d'une atmosphère réductrice :

Sable blanc	250
Carbonate de soude sec.	100
Carbonate de chaux.	50
Battitures de fer légèrement calcinées . .	100 à 115
Battitures de cuivre.	20 à 25

Sable blanc	250
Carbonate de soude.	100
Carbonate de chaux.	50
Battitures de cuivre.	15 à 25
Sanguine	150

L'aventurine nous paraît être moins le produit de la fusion que du refroidissement ; aussi doit-on attacher une grande importance au refroidissement, qui doit être lent et gradué.

Aventurine verte à base de chrome. — En 1865, Pelouze a découvert un verre analogue à l'aventurine, mais dans lequel les cristaux sont formés par l'oxyde de chrome, ce qui donne à cette aventurine une couleur verte d'un très bel effet.

Voici le dosage indiqué par Pelouze :

Sable.	250
Carbonate de soude sec. . . .	100
Carbonate de chaux.	50
Bichromate de potasse	40

Il est à remarquer que les cristaux sont plus nombreux à la surface qu'à l'intérieur des pièces ; aussi est-il recommandé, pour obtenir de cette aventurine tout l'effet qu'elle est susceptible de produire, de la couler en plaques de faible épaisseur.

128. — Verres filigranés. — On donne ce nom à des verres dans la masse desquels se trouvent, sous les formes les plus variées, des émaux opaques blancs ou colorés.

Les procédés employés pour la fabrication de ces verres ne sont bien connus que depuis les recherches auxquelles Bontemps s'est livré et qu'il a publiées sous le titre d'*Exposé des moyens employés pour la fabrication des verres filigranés*.

Qu'ils soient à simple filet ou à ornementation compliquée, les verres filigranés sont formés par l'assemblage d'un certain nombre de petites baguettes de forme cylindrique, préparées à l'avance, disposées dans un ordre préalablement déterminé, et souvent alternées avec des baguettes de verre incolore et transparent, réunies ensemble par la chaleur et par le soufflage ; elles sont ensuite façonnées en vases de formes variées, comme toute autre pièce de verre ordinaire. Ces baguettes sont d'une fabrication fort simple, mais qu'il est nécessaire de faire connaître avant d'aller plus loin.

Pour faire une baguette de verre coloré, l'ouvrier prend

avec sa canne une certaine quantité de ce verre dans le creuset et le roule sur une plaque de fer ou de tôle nommée marbre, de façon à en former une masse cylindrique de 6 ou 8 centimètres de longueur. Quand cette masse, qui reste adhérente à la canne, est assez refroidie pour offrir une certaine résistance, on la plonge dans un creuset, qui renferme le verre incolore destiné à faire au premier une enveloppe transparente ; on roule de nouveau cette matière sur le marbre, et on en forme une espèce de tronçon de colonne de 7 à 8 centimètres de diamètre.

Ce tronçon ayant été réchauffé, on l'étire de manière à lui faire gagner en longueur ce qu'il perdra en circonférence ; pour arriver à ce résultat, un ouvrier colle un pontil à la partie du verre non adhérente à la canne, et, marchant toujours à reculons en sens inverse de l'ouvrier qui tient la canne, il arrive, grâce à l'extrême ductilité du verre, à obtenir un fil ou baguette mince qui peut avoir jusqu'à 380 mètres de longueur, et dont le diamètre varie suivant qu'il a été plus ou moins étiré.

Ces baguettes sont alors brisées en plusieurs parties égales, de la grandeur de l'objet à exécuter, et forment, par l'aplatissement qui a lieu pendant la fabrication, ces filets simples plus ou moins larges, dont sont ornés un grand nombre de verres.

La confection des filigranes torsinés, des cannes ritortes, offre plus de difficultés ; voici, d'après Bontemps, comment on les fabrique : « Pour obtenir des baguettes à fils en spirale rapprochées, qui, par leur aplatissement, produisent des réseaux à mailles égales, on garnit l'intérieur d'un moule cylindrique, en métal ou en terre à creusets, de baguettes de verre coloré, à filet simple, alternées avec des baguettes de verre transparent ; puis, le verrier prend au bout de sa canne du verre

transparent, dont il forme un cylindre massif qui puisse entrer dans le moule garni de ces petites baguettes, et chauffé préalablement un peu au-dessous de la chaleur rouge.

En chauffant ce cylindre fortement, il l'introduit dans le moule, où il le refoule, de manière à presser les baguettes, qui adhèrent ainsi contre le verre transparent ; il enlève la canne en retenant le moule, et entraîne ainsi les baguettes avec le cylindre ; il chauffe encore, et il marbre, pour rendre l'adhérence plus complète ; enfin, chauffant l'extrémité du cylindre, il tranche d'abord cette extrémité avec les fers, il la chauffe de nouveau, la saisit avec une pincette et la tire de longueur avec sa main droite, pendant que de la main gauche il fait tourner rapidement la canne sur les bardelles (bras) de son banc. Pendant que l'extrémité de la colonne s'allonge, les filets de verre coloré s'enroulent en spirale autour d'elle (*fig.* 125).

Quand l'ouvrier a amené une baguette à la dimension voulue, environ 0m,006 de diamètre, et que les filets sont suffisamment enroulés, il la tranche avec la pincette, chauffe à nouveau le verre adhérent à la canne, et, le saisissant et l'étirant pendant qu'il roule rapidement la canne, il procède ainsi à la production d'une nouvelle baguette, et ainsi de suite, jusqu'à ce que toute la colonne soit étirée.

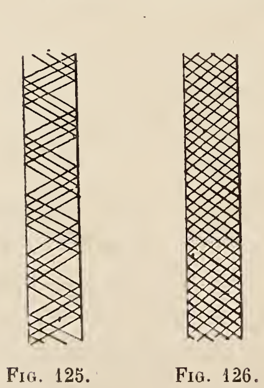


Fig. 125. Fig. 126.

« Pour fabriquer des baguettes qui, par leur aplatissement, produisent des filets en quadrilles (*fig.* 126), on place dans le moule cylindrique, aux deux extrémités

d'un seul diamètre, trois ou quatre baguettes de verre coloré à filet simple, alternées avec des baguettes en verre transparent ; on garnit ensuite la capacité intérieure du moule de baguettes transparentes, afin de maintenir les baguettes à filets colorés dans leur position, et on opère comme pour les baguettes précédentes.

« Pour obtenir des baguettes produisant, par leur aplatissement, des grains de chapelet, on fait une paraison soufflée, dont on ouvre l'extrémité opposée à la canne, de manière à produire un petit cylindre ouvert ; on l'aplatit afin de ne donner passage qu'à des baguettes, et on introduit dans ce fourneau cinq ou six baguettes à filets simples, colorées, alternées avec des baguettes de verre transparent ; on chauffe, on ferme l'extrémité opposée à la canne, puis l'ouvrier presse sur la paraison plate, pendant qu'un aide aspire l'air de la canne, de manière à le faire sortir de la paraison et à produire un massif plat, dans lequel sont logées les baguettes à filets. L'ouvrier rapporte successivement une petite masse de verre chaud transparent sur chacune des parties plates de sa paraison, et il marbre pour cylindrer sa masse. Il obtient ainsi une petite colonne dans l'intérieur de laquelle sont rangés, sur un même diamètre, les filets colorés ; il procède ensuite comme pour les baguettes précédentes, en chauffant et étirant l'extrémité, pendant qu'il roule rapidement la canne sur les bardelles. Par ce mouvement de torsion, la ligne de filet se présente alternativement de face et de profil, et produit des grains de chapelet (*fig.* 127). On conçoit que les baguettes de verre coloré placées au centre de la colonne étant, par le mouvement de torsion, croisées les unes sur les autres, semblent présenter comme un grain de chapelet formé de fils, qui laissent entre eux un espace incolore mé-

nagé par les baguettes de verre transparent, qui alternent dans la paraison avec les baguettes de verre coloré.

« Il arrive souvent que l'on combine les grains de chapelet avec les quadrilles des baguettes précédentes en se servant, pour introduire dans le moule préparé pour les baguettes à quadrille, du cylindre préparé pour les grains de chapelet.

« Quelquefois on ménage au centre d'une baguette un filet en zigzag (*fig.* 128). Pour cela, on prépare un premier cylindre massif en verre transparent, de moitié du diamètre de celui que l'on veut étirer, et on fait adhérer, parallèlement à l'arête de ce cylindre, une petite colonne colorée; on recouvre le tout d'une nouvelle couche de verre transparent, pour produire un cylindre de la dimension voulue pour entrer dans le moule des baguettes à filets. La petite colonne colorée, n'étant pas au centre du cylindre, tournera en spirale autour de ce centre par le mouvement d'étirage et de torsion, et produira un zigzag par l'aplatissement. »



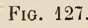


Fig. 127.

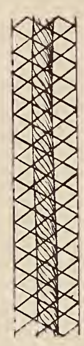


Fig. 128.

« Voici maintenant, toujours d'après les indications de Bontemps, publiées par M. Labarte, les moyens employés pour fabriquer avec ces baguettes les verreries à dessin de couleur, soit en simple laticinio, soit en filigrane :

« Lorsque le verrier est en possession de baguettes de verre coloré, de baguettes à dessin filigranique et de baguettes de verre transparent et incolore, il peut procéder comme il suit à la fabrication des vases. Il range

circulairement contre la paroi inférieure d'un moule cylindrique de métal ou de terre à creusets, plus ou moins élevés (*fig.* 129), autant de baguettes qu'il lui en faut pour recouvrir exactement cette paroi. Ces baguettes sont fixées au fond du moule au moyen d'une petite couche de terre molle qu'il y a placée. Il peut les choisir de plusieurs couleurs ou de plusieurs modèles, présentant autant de combinaisons filigraniques différentes : il peut les alterner ou les espacer par des baguettes de verre transparent et incolore. Les baguettes étant ainsi disposées, on fait chauffer le moule auprès du four de verrerie, non pas pour les ramollir, mais pour les rendre susceptibles d'être touchées par du verre chaud ; alors le verrier prend avec sa canne un peu de verre transparent et incolore, pour en souffler une petite paraison, qu'il introduit dans l'espace vide, formé par le cercle des baguettes qui couvrent la paroi du moule ; il souffle de nouveau pour presser cette paraison contre les baguettes et les y faire adhérer, et retire le tout du moule.

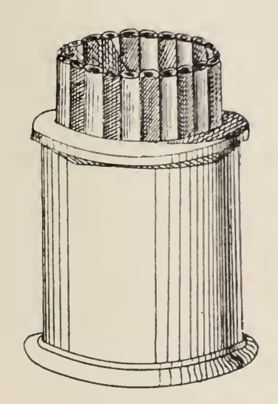


Fig. 129.

L'aide verrier applique à l'instant sur les baguettes colorées ou filigranées, qui sont ainsi venues former la surface extérieure de cette masse cylindrique, un cordon de verre à l'état pâteux, afin de les fixer davantage sur la paraison.

La pièce étant ainsi disposée à l'extrémité de la canne à souffler, le verrier la porte à l'ouvreau du fourneau pour la ramollir, en faire adhérer toutes les parties, et lui

donner une élasticité capable de la faire céder facilement à l'action du soufflage; puis, il la roule sur le marbre, et, lorsque les différentes baguettes réunies pour le soufflage et la fabrication sont arrivées au point de constituer elles-mêmes une paraison dont toutes les parties sont compactes et homogènes, il tranche avec une sorte de pince un peu au-dessus du fond, de manière à réunir les baguettes en un point central.

La masse vitreuse ainsi obtenue est alors traitée par le verrier par les procédés ordinaires, et il en fabrique à son gré une aiguière, une coupe, un vase, un gobelet, où chaque baguette, soit colorée, soit à dessin filigranique, vient former une bande.

« Si le verrier n'a donné aucun mouvement de torsion à la paraison pendant la fabrication, les filets de verre coloré ou les dessins filigraniques restent en ligne droite, partant du bas du vase à la partie supérieure, ou du centre à la circonférence. Mais si, après avoir fait adhérer les baguettes, il a imprimé un mouvement de rotation à la canne, en retenant l'extrémité inférieure des baguettes avec les fers, il en est résulté une torsion imprimant aux différents filets colorés ou à dessins filigraniques, qui sont entrés dans la composition du vase, cette direction en spirale qu'on rencontre fréquemment dans les verreries vénitiennes (*fig.* 130). Les verreries de Murano don-

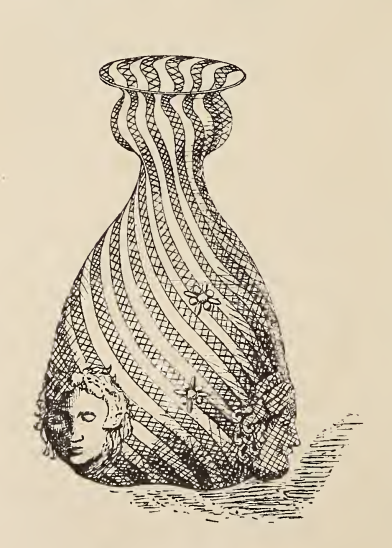


Fig. 130.

naient à ce travail de torsion le nom de « ritorcimenta ».

Les vases ainsi fabriqués étaient appelés autrefois en Italie *vasi a ritorti*, et plus anciennement *a virtortoli*, on les nomme aujourd'hui *a filigrana ritorta*.

129. — Millefiori. — On connaît ces objets en verre, presse-papiers, boules, dans l'intérieur desquels on voit une multitude de fleurs aux couleurs les plus variées, souvent même des images, des figurines, etc.

On les obtient en recouvrant d'une paraison de verre blanc des verres filigranés disposés dans les rainures d'une plaque de fonte ; on donne ensuite à l'ensemble la forme sphérique, demi-sphérique ou aplatie.

Il est certains de ces objets dans lesquels on a incrusté des matières absolument étrangères au verre, des figurines en terre cuite, des têtes de pipes. Ces pièces ne peuvent être incorporées au verre qu'après avoir été chauffées au préalable, en outre il faut employer un verre parfaitement affiné et très chaud et éviter d'emprisonner des bulles d'air dont la présence enlèverait à l'objet le quelque peu de valeur qu'il possède.

130. — Perles. — L'industrie des perles est une de celles qui avaient pris à Venise la plus grande extension. Outre les perles qui étaient fabriquées pour l'Afrique, où elles servaient et servent encore de monnaie, on en faisait d'autres qui étaient employées à la confection de chapelets, qu'on expédiait à Rome, à Jérusalem, partout où on avait institué des pèlerinages. On en fabriquait également des colliers, des bracelets et mille autres fantaisies que l'habileté des verriers savait varier à l'infini.

Cette industrie avait précédé, à Venise, celle de la fabrication des glaces ; elle a survécu à cette dernière.

car, aujourd'hui encore, de nombreuses usines s'occupent de la fabrication des perles.

On distingue les perles en perles ordinaires ou « conteries » et en perles de choix ou orientoïdes.

Les premières sont obtenues avec des tubes de verre creux qu'on découpe à l'aide d'un couteau d'acier en leur donnant une longueur égale au diamètre que devra avoir la perle. Ces petits cylindres creux sont jetés dans un mélange de chaux et de charbon en poudre fine, et le tout légèrement humecté. On brasse ces morceaux de verre avec le mélange qui, pénétrant à l'intérieur, obture momentanément la partie vide. Cette pratique a pour but d'éviter que, pendant le ramollissement auquel ces verres sont soumis, les vides intérieurs ne s'obturent par le verre lui-même. On porte le tout dans un appareil analogue aux brûloirs à café, auquel on imprime un mouvement de rotation dans un four chauffé au rouge cerise. Sous l'action de la chaleur et de ce mouvement rotatoire, les arêtes s'émoussent.

Après refroidissement on tamise le tout pour recueillir les perles dont on dégage ensuite la partie centrale par agitation dans un sac.

Les perles sont ensuite classées par grosseur et d'après leur aspect plus ou moins satisfaisant, puis on procède à leur polissage en les agitant dans un sac avec du sable, puis avec du son.

Les perles communes plus grosses sont obtenues par soufflage sur le tube de verre lui-même. Ce procédé de soufflage est dû au Vénitien Andrea Viadore, il remonte à l'année 1528. C'est le seul qui soit employé pour la fabrication des perles fines.

Ces dernières affectent diverses formes : sphères parfaites, poires plus ou moins allongées pour boucles

d'oreilles. Elles doivent ressembler aux perles naturelles; aussi leur exécution demande-t-elle, de la part de l'ouvrier, une très grande habileté.

Un bon souffleur doit connaître les perles naturelles, généralement irrégulières de formes, pour n'exécuter sur les siennes que les défauts qui peuvent faire valoir l'œuvre sortie de ses mains. Pour obtenir ce résultat important, le souffleur frappe avec une petite palette sur certaines parties de la perle encore malléable, qu'il vient de fabriquer ; il produit de la sorte : ici une saillie, là un méplat presque imperceptibles, qui, enlevant à l'objet sa régularité mathématique, en fait une imitation plus ou moins parfaite de la perle naturelle.

Perles colorées. — Autrefois la coloration était donnée par le verre lui-même. On les fabrique maintenant en garnissant la surface intérieure avec les matières colorantes convenables, rendues adhérentes par de la colle incolore.

Les belles perles dites « orientoïdes » reçurent d'abord un orient factice à l'aide d'une couche de mercure, jusqu'au moment où un perlier de Paris nommé Jacquin, trouva, en 1686, le moyen de remplacer le mercure, dont les émanations sont très dangereuses, par la matière nacrée provenant des écailles de l'ablette.

Les écailles d'ablette sont mélangées à de l'eau salée et à de l'ammoniaque, de façon à constituer une pâte fluide qui, soumise à plusieurs purifications, donne finalement une liqueur d'un reflet et d'un éclat magnifiques, à laquelle on donne le nom de liqueur d'orient.

On estime qu'il faut environ cinquante mille ablettes pour fournir 1 kilogramme de cette essence.

Ainsi préparée, la liqueur d'orient est introduite par

insufflation dans chaque perle, dont la surface intérieure a été au préalable recouverte d'un peu de colle incolore.

131. — Verres murrhins. — On donne ce nom à des objets ayant l'aspect de mosaïques. Ils sont formés de verres de différentes couleurs, agglomérés, soudés les uns aux autres par du verre incolore, puis travaillés, polis de manière à leur donner généralement la forme de coupes ou sébilles.

Ces objets n'ont de valeur qu'autant que le mélange des verres a été fait avec un goût parfait.

On fabrique depuis quelque temps un produit industriel qui, sans avoir, à beaucoup près, la valeur des verres murrhins, présente avec eux une grande analogie de fabrication.

Le procédé, dénommé « procédé de fabrication des marbres factices et vitraux », consiste à agglomérer à chaud et par voie de soudage des morceaux ou déchets de verres de toute nature et couleur.

Une des particularités du procédé gît dans l'association aux fragments de verre, de cristal, de faïence, de porcelaine, de roches naturelles volcaniques et vitrifiables telles que le basalte, les trachytes à texture compacte et à couleurs variées.

Les morceaux de natures diverses, broyés ou concassés à grosseur déterminée, sont introduits dans un moule, qui est ensuite chauffé à la température voulue pour amener l'agglomération.

Dès que cette première fusion — incomplète — est terminée, on passe le moule dans un four à recuire en garnissant d'abord le fond du moule de verre très ordinaire et appliquant sur cette matière commune du verre riche teinté ; on réalise un produit d'une seule masse très homo-

gène et d'un effet décoratif des plus séduisants, quoique d'un prix de revient très réduit.

Pour faire les marbres, on trace au préalable des sinuosités en creux sur la couche du fond, sinuosités qui sont remplies de matières colorées dans les tons du marbre à imiter.

Dans le même ordre d'idées, M. Cros a préparé des verres polychromes, qui sont la reproduction de pièces du même genre qui ont été recueillies à Pompéi et en Égypte. Les résultats qu'a obtenus M. Cros, à l'aide de procédés qui lui sont particuliers, permettent de prévoir que l'industrie pourra obtenir des effets décoratifs présentement inusités, mais familiers aux verriers de l'antiquité.

132. — Mosaïque. — Les anciens connaissaient ce mode de décoration, et l'application en était très répandue dès les premiers siècles de l'ère chrétienne, pour la reproduction des tableaux des maîtres de l'époque : témoin la célèbre mosaïque qu'on voit au musée de Naples et qui est la reproduction d'un tableau représentant la bataille d'Arbelles, gagnée, en 331 avant Jésus-Christ, par Alexandre sur Darius.

Vers le IVe siècle, la mosaïque devient le mode de décoration par excellence des édifices religieux, aussi bien en Orient qu'en Occident, et conserve son prestige jusqu'à la Renaissance, époque à laquelle cet art s'efface devant la peinture.

Actuellement, la mosaïque revient en faveur et tout fait prévoir que cet art, qui se relève en France, sera apprécié comme il mérite de l'être et se généralisera.

L'artiste mosaïste doit avoir à sa disposition des

émaux de toutes couleurs et aux nuances les plus variées. Il exécute ses compositions de la façon suivante :

Dans une caisse ayant la dimension du dessin à reproduire on coule du plâtre en couche bien plane, sur laquelle on trace ensuite le dessin au crayon. A l'aide d'un outil spécial, l'ouvrier enlève peu à peu le plâtre, saupoudre la partie creusée d'un peu de pouzzolane, puis y encastre un fragment d'émail de la couleur voulue.

Quand le dessin est complètement reproduit, on détermine l'adhérence de tous ces fragments vitreux, en collant à la surface une feuille de carton ; cela fait, on retourne la caisse et on applique l'ensemble de ce dessin sur une couche de ciment. Après solidification, on enlève le carton, et la mosaïque est constituée à l'état de panneau que l'on applique là où elle doit être placée. Le procédé porte en Italie, où il est très en honneur, le nom de mosaïca a rivoltatura.

Les mosaïques communes sont fabriquées par un procédé beaucoup plus expéditif qui consiste à décalquer à l'envers le dessin sur un papier qu'on colore ensuite ; les fragments d'émaux sont collés sur le papier en se guidant sur la coloration. Quand le dessin est exécuté. on retourne l'ensemble pour l'appliquer dans le mastic.

Les émaux de mosaïque sont généralement préparés avec la composition :

Sable	1,300
Nitrate de potasse.	60
Fluorure de calcium	300
Carbonate de soude	400
Émail broyé.	500
Minium	600

Cette composition est colorée par des oxydes métal-

liques. Les émaux destinés aux fonds d'or ou d'argent sont préparés à Murano en plaçant une feuille d'or ou d'argent sur un disque en verre incolore légèrement concave. On fait chauffer, puis on recouvre d'émail en fusion ; on aplanit et on réchauffe lentement.

Dans ces derniers temps, on a eu l'idée d'appliquer les émaux composant une mosaïque ou un dessin quelconque directement sur étoffes. Les émaux, préparés en plaquettes très peu épaisses, sont collés sur le tissu auquel ils sont rendus adhérents au moyen d'une dissolution de caoutchouc dans la benzine.

133. — Verre filé. Coton ou laine de verre. — Les propriétés de malléabilité du verre permettent de le filer en fils fins aussi ténus que de la soie, et on a fait longtemps à Venise des étoffes tissées avec du verre filé des couleurs les plus variées. Le verre présente pour cet usage l'inconvénient de ne pas posséder une élasticité suffisante ; ces étoffes, en effet, s'usent rapidement, les fils de verre se cassant à l'endroit où ils ont été pliés.

Pour obtenir le verre aussi fin qu'il le faut et suivant les usages auxquels il est destiné, on l'étire à la lampe d'émailleur en l'enroulant sur des tambours en bois ou en carton animés de la vitesse voulue.

Le verre a été préalablement préparé en fils ou baguettes de gros diamètre, qu'on réchauffe localement à une de leurs extrémités.

Le verre filé, qui se fait de toute couleur, sert pour des objets de parure et de modes, et en particulier pour des aigrettes.

Coton ou laine de verre. — Le coton ou laine de verre,

qui doit être vendu à un prix beaucoup plus bas que le verre filé, est obtenu par des procédés différents, plus économiques.

Pour le fabriquer on dirige un jet de vapeur surchauffée, de telle façon qu'il coupe en angle droit un filet de verre fondu, extrêmement fluide, tombant verticalement d'un creuset ou d'un four où il a été préalablement fondu ; ce jet de vapeur animé d'une très grande vitesse divise la veine fluide et forme une série de petites sphères qui, entraînées elles-mêmes, étirent derrière elles le fil auquel elles sont attachées; il s'ensuit que le produit brut obtenu est composé de fils très fins, au milieu desquels sont disséminées une multitude de petites boules de verre qu'on peut séparer ou non après coup.

On utilise un produit analogue obtenu avec des laitiers de haut fourneau à la confection d'enveloppes calorifuges.

	Coefficients d'isolement
Poils	100
Laine minérale de 1re qualité	83
Sciure de bois	68
Laine minérale de 2e qualité	67
Charbon de bois	63
Sapin coupé en travers	55
Terre	54
Asbeste	36
Enveloppe d'air	13

Les expériences dont nous donnons ci-dessus les résultats montrent que ce produit, nommé « laine minérale », est un isolant de premier ordre, qui est d'autant plus actif qu'il est plus ténu. Il présente, en outre, sur la plupart des autres matières isolantes l'avantage de ne pas s'altérer à la chaleur.

Emploi du verre filé pour la fabrication des mèches

de lampes. — On fabrique, en Allemagne, des mèches de lampes en verre filé; elles présentent sur les mèches ordinaires l'avantage de débiter plus régulièrement le liquide (pétrole ou alcool), de pouvoir être maniées avec plus de sécurité et de donner lieu à une odeur moins désagréable.

Verre diamanté. — On utilise encore la grande malléabilité du verre pour la confection d'un produit connu dans le commerce sous le nom de *diamanté*, employé par les fabricants de fleurs artificielles.

Ce verre, qui n'a pas une épaisseur de plus de 1/20 de millimètre, est obtenu en soufflant fortement dans des tubes de verre minces, chauffés à une de leurs extrémités ; on obtient ainsi des vessies informes qu'on écrase ensuite entre deux linges.

La poudre très légère et brillante ainsi obtenue est analogue, comme éclat, aux plus belles lamelles de mica.

134. — Yeux artificiels. — La fabrication des yeux artificiels a une importance beaucoup plus considérable qu'on n'est porté à le supposer généralement, soit qu'il s'agisse de reproduire les yeux d'animaux, soit qu'on veuille reproduire les yeux devant servir à la prothèse oculaire humaine.

La fabrication des yeux d'animaux se fait au moyen d'émaux des couleurs les plus variées, dont la composition doit être telle que l'accord soit complet entre eux, c'est-à-dire qu'ils aient tous le même coefficient de dilatation.

On commence par former à la lampe d'émailleur, en verre de couleur convenable, une sorte de lentille devant

former la cornée, sur laquelle on soude successivement les émaux destinés à former l'iris, puis la pupille ; le tout est ensuite recouvert d'un cristal très blanc, donnant à l'œil sa dimension définitive.

Les yeux qu'on fabrique ainsi sont aussi variés de couleur que de dimension; ils sont généralement recuits.

La fabrication de ces produits spéciaux se fait principalement à Paris et donne lieu à un commerce important : ces yeux servent non seulement à la naturalisation, mais encore pour des jouets, des poupées et des objets de mode.

Les yeux servant à la prothèse oculaire humaine doivent être fabriqués par des spécialistes avec des soins tout particuliers ; pour ne pas fatiguer celui qui les porte, ils doivent être aussi légers que possible et fabriqués en verre peu altérable, les liquides sécrétés dont ils sont baignés ayant une tendance à en altérer la surface et à la dépolir. Pour les obtenir, on commence par faire à la lampe d'émailleur une coque en émail de la forme de l'œil à imiter et d'une épaisseur analogue à celle d'une coquille d'œuf ; sur cette coque on rapporte après coup des émaux de couleur destinés à former l'iris et la pupille.

Ces objets fabriqués avec grand soin sont d'une imitation parfaite ; ils sont toujours d'un prix relativement élevé.

§ 4. — Vitraux

Quoique le verre ait été employé à la décoration des monuments presque en même temps pour ainsi dire qu'il a été découvert, comme l'attestent les mosaïques trouvées à diverses époques en Assyrie, en Phénicie, en Égypte, en Grèce, en Italie, il est à peu près certain que ce n'est qu'au VIe siècle qu'on paraît avoir pensé à l'utiliser pour la décoration des fenêtres des édifices religieux, sous la forme de vitraux, sortes de mosaïques translucides, formées de morceaux de verre diversement colorés, juxtaposés et réunis entre eux. Il résulte d'une étude très intéressante qu'a faite M. Lucien Magne, que c'est en France, dans les Gaules, que la pratique de cet art paraît avoir pris naissance. Par le développement qu'il a pris du VIIe au XVIe siècle, par l'importance et le nombre des œuvres qu'il a enfantées, dont malheureusement une trop faible partie nous a été conservée, on peut dire qu'il a été l'un des éléments décoratifs les plus précieux de l'architecture française.

Ce n'est qu'en petit nombre qu'on trouve des vitraux anciens dans quelques monuments des divers États de l'Europe, et encore ont-ils été exécutés, le plus souvent, sous l'inspiration d'artistes français.

Le vitrail est une sorte de mosaïque ou d'émail cloisonné; il serait aussi logique de le comparer à une tapisserie transparente; on peut assimiler une verrière rigoureusement décorative à un tapis d'Orient, comme on peut ranger le vitrail de style moins archaïque dans la

famille des grandes tapisseries d'origine flamande, où les figures, dont l'ensemble constitue un sujet unique, se superposent de manière à faire comprendre une surface à peu près plane, sinon un seul plan.

Les procédés de fabrication mis en œuvre dans l'art de la peinture sur verre depuis 800 ans et que l'on n'a pas la liberté de changer, ne se prêtent nullement d'ailleurs à une assimilation entre le vitrail et le tableau.

La multiplicité des plombs et la petite dimension des pièces de verre sont indispensables à la solidité et à l'effet; elles entraînent à leur suite un système d'exécution tout particulier et dans lequel un dessin clairement indiqué, des figures aux gestes simples, mais peintes largement, produisent de vigoureux et puissants contrastes. En résumé, le plomb qui assure la solidité en divisant le verre en petits fragments et qui accuse fortement les silhouettes, le verre coloré dans la masse, seul moyen d'obtenir une coloration franche et transparente, sont, en sus des nécessités de composition dont nous venons de parler, les conditions essentielles du véritable vitrail.

La manufacture de Sèvres exécutait autrefois des vitraux dans lesquels le plomb était à peu près supprimé, et la coloration obtenue au moyen d'émaux peints sur le verre blanc; mais ce procédé, d'un emploi fort difficile et fort coûteux, se trouvait si impuissant, qu'un vitrail ainsi compris n'avait guère plus de valeur qu'un beau store et constituait une œuvre excessivement fragile.

Les artistes de nos jours s'efforcent, en tenant compte des qualités qui appartiennent à ces deux modes de compositions des vitraux, de les combiner de façon à réunir la force et la souplesse, les nuances correctes du modèle et la vigueur d'un puissant cloisonnage.

Ce résultat n'est évidemment pas aisé à obtenir, mais il n'en donne que plus de valeur aux conceptions hardies de ceux qui entreprennent ce difficile assemblage.

135. — Fabrication des vitraux pour décoration. Vitraux peints. — Pour la peinture du verre on a recours à :

1° Un fondant vitreux, sorte de cristal, plus fusible que le verre ;

2° Une matière colorante formée par un ou plusieurs oxydes métalliques.

Voici la composition de divers fondants :

Sable	100	fondant n° 1
Minium	600	
Acide borique cristallisé	300	

	Fondants n° 2		
Sable	200	500	400
Minium	600	1,500	300
Borax	100	500	600

Quartz	5
Minium	8
Salpêtre	1
$KOCO^2$	1

Les oxydes métalliques colorants sont ordinairement obtenus par précipitation. Ainsi pour l'oxyde de cobalt et l'oxyde de fer, dont l'emploi en mélange doit donner une matière colorante, on en fait deux dissolutions en chlorures contenant exactement la proportion relative des deux métaux. On précipite les solutions par un excès de $NaOCO^2$, on lave et on calcine en présence de chlorure de sodium ; on lave de nouveau et on soumet à une nouvelle calcination, mais cette fois sans addition de chlorure de sodium.

Voici la composition des diverses matières colorantes :

	Couleurs brunes			
	Brun	Bois	Sépia	Noirâtre
Fer	56	56	56	56
Zinc	33	33	33	33
Mélange d'oxydes de cobalt et de nickel	»	4	12	38

	Noir
Oxyde de cobalt	56
Fer métallique (employé en oxyde)	56

	Bleu
Carbonate de cobalt	60
Alumine hydratée	135 à 180

Rouges	
Colcothar	quantité variable
Pourpre de Cassius	quantité variable

	Verts	Verts bleuâtres
Oxyde de chrome	76	38
Alumine hydratée	135	135
Oxyde de cobalt	»	38

On obtient l'oxyde de chrome en mélangeant du bichromate de potasse avec du soufre. Ce mélange est placé dans un têt d'argile au centre duquel on dispose un morceau de soufre auquel on met le feu. Quand la combustion est complète, on lave et on recueille l'oxyde de chrome. Pour l'application, on fait un mélange de vingt-cinq parties de fondant pour dix parties d'oxyde métallique qu'on broie ensuite et qu'on délaye dans l'essence.

136. — Exécution d'un vitrail. — L'artiste opère d'après un tableau ou dessin dont il fait, au préalable, une copie ou « carton » à grandeur d'exécution.

Sur ce carton sont indiquées les grandes barres, c'est-à-dire les lignes transversales qui représentent la place qu'occuperont les fers destinés à soutenir le vitrail dans la baie de la fenêtre.

L'artiste doit, dans l'étude du croquis, ou « maquetté »,

s'être arrangé de manière que le passage de ces barres ne coupe aucune partie intéressante de son sujet. On ne saurait apporter trop de soins dans le placement des barres, car c'est le seul noir qui nuise dans le vitrail, et l'on ne peut malheureusement s'en dispenser. Les plombs, en accusant les contours ne font, quand ils sont bien placés, que donner plus d'énergie au dessin.

Sur le vitrail terminé on met assez fréquemment, sur la face opposée à la peinture, une couche de « dépoli », qui a pour but d'en diminuer l'éclat, pour se rapprocher de l'effet produit par les vitraux anciens.

Ce dépoli est composé de :

Porcelaine pilée.	300
Fondant n° 2	200

On prépare également des vitraux à l'aide de verres colorés, doublés ou triplés, sur lesquels on enlève ensuite à la roue ou à l'acide, aux endroits voulus, tout ou partie de la couche colorée. Pour les objets de fabrication industrielle on procède à cet enlevage par impression d'une réserve et par immersion dans l'acide fluorhydrique.

Crayons pour écrire sur le verre. — M. Lacroix a su combiner les matières colorantes avec un support qui puisse les maintenir. Chaque trait laisse sur le verre assez de matière colorante pour qu'on ait un dessin par la cuisson. On fait ainsi des paysages, des portraits, etc.

CHAPITRE VII

VERRES DURS. — VERRES MALLÉABLES

137. — Verres durs à base d'alumine. — Les verres durs à base d'alumine, colorés et taillés, sont employés avec avantage pour l'imitation des pierres précieuses. Allant plus loin dans cette voie, MM. Frémy et Feil ont cherché et réussi à reproduire les gemmes rubis et saphir avec les qualités et toutes les propriétés que possèdent les pierres naturelles.

Les méthodes qu'ils ont employées nous paraissant présenter un haut intérêt scientifique ; nous ne pouvons résister au désir d'en donner ici la description.

C'est dans le four de l'usine Feil qu'ont été disposées les expériences qui exigeaient la plus haute température. Lorsque ces essais demandaient une calcination prolongée et une assez forte quantité de matière, on avait recours à un four à glaces de Saint-Gobain, et dans ce cas ces essais étaient dirigés par M. Henrivaux.

La méthode qui a permis à MM. Frémy et Feil de produire la plus grande quantité d'alumine cristallisée est la suivante :

On commence par former un aluminate fusible et on

le chauffe ensuite au rouge vif avec une substance siliceuse ; dans ce cas, l'alumine se trouve dégagée lentement de sa combinaison saline en présence d'un fondant et cristallise. Nous attribuons la cristallisation de l'alumine à différentes causes : soit à la volatilisation de la base qui est unie à l'alumine, soit à la réduction de cette base par les gaz du fourneau, soit à la formation d'un silicate fusible qui, par la combinaison de la silice avec la base, isole l'alumine, soit enfin à un phénomène de liquation qui produit un silicate très fusible et de l'alumine peu fusible : tous ces cas se sont présentés dans ces essais ; mais le déplacement de l'alumine par la silice paraît être le procédé le plus sûr pour opérer la cristallisation de l'alumine.

Plusieurs aluminates fusibles se prêtent à ces différents genres de décomposition ; celui qui jusqu'à présent a donné les résultats les plus nets est l'aluminate de plomb.

Lorsqu'on place dans un creuset de terre réfractaire un mélange de poids égaux d'alumine et de minium, et qu'on le calcine au rouge vif pendant un temps suffisant, on trouve dans le creuset, après son refroidissement, deux couches différentes ; l'une est vitreuse et formée principalement de silicate de plomb, l'autre est cristalline, elle présente des géodes remplis de beaux cristaux d'alumine.

Dans cette opération, les parois du creuset agissent par la silice qu'elles contiennent ; elles sont toujours amincies et souvent percées par l'action de l'oxyde de plomb : aussi, pour éviter la perte du produit, on opère ordinairement dans un double creuset.

L'expérience qui vient d'être décrite donne des cristaux blancs de corindon : lorsque l'on veut obtenir des

cristaux qui présentent la couleur rose du rubis, on ajoute au mélange d'alumine et de minium 2 à 3 0/0 de bichromate de potasse.

On produit la coloration bleue du saphir en employant une petite quantité d'oxyde de cobalt mélangé à une trace de bichromate de potasse.

Les cristaux de rubis ainsi obtenus sont ordinairement recouverts de silicate de plomb, que l'on enlève de différentes façons, soit par l'action de l'oxyde de plomb fondu, soit par l'acide fluorhydrique, soit par la potasse en fusion, soit par une calcination prolongée dans l'hydrogène, et ensuite par l'action des alcalis et des acides ; mais, dans certains cas, on trouve, dans les géodes, des cristaux qui sont presque purs et qui présentent alors tous les caractères des corindons et des rubis naturels, ils en ont la composition, l'éclat adamantin, la dureté, la densité et la forme cristalline.

Ces rubis en effet rayent le quartz et la topaze ; leur densité est de 4,0 à 4,1 : ils perdent, comme les rubis naturels, leur coloration rose lorsqu'ils sont fortement chauffés et la reprennent par le refroidissement ; soumis à des lapidaires, ils ont été trouvés aussi durs que les rubis naturels et souvent même plus durs ; ils usent très rapidement les meilleures meules d'acier trempé. Ces rubis, qui ont la forme de prismes hexagonaux, offrent dans leur intérieur une croix noire et des anneaux colorés sur les bords.

Voici la méthode qui a permis à MM. Frémy et Feil de produire les beaux échantillons de silicates cristallisés que ces messieurs ont mis sous les yeux de l'Académie ; les expériences qui suivent se lient aux précédentes, car elles ont donné souvent des cristaux de corindon à côté des silicates cristallisés.

C'est au moyen des fluorures que ces messieurs ont produit les corps cristallisés, dont il reste à parler.

Soumettant à une température rouge, pendant plusieurs heures, un mélange à poids égaux de silice et de fluorure d'aluminium, on a constaté que, par la réaction mutuelle des deux corps, il se dégage du fluorure de silicium, et l'on obtient un corps cristallisé qui paraît être du dysthène, c'est-à-dire du silicate d'alumine.

Ce corps se présente en cristaux aciculaires biréfringents, qui éteignent la lumière obliquement par rapport à leurs arêtes; ils appartiennent sans doute à l'un des systèmes obliques: au prisme oblique à base rhombe ou au prisme doublement oblique. Ces cristaux ont offert la composition suivante:

Silice	47,66
Alumine	51,85
Perte	0,50

Cette composition se rapproche de celle du dysthène naturel. L'action du fluorure d'aluminium sur l'acide borique a donné un borate d'alumine cristallisé, qui correspond au dysthène.

Le fait important de la volatilité du fluorure d'aluminium, découvert par Henri Sainte-Claire Deville, a permis d'expliquer facilement les expériences suivantes:

Lorsqu'on chauffe à une température très élevée et pendant longtemps, un mélange à poids égaux d'alumine et de fluorure de baryum, dans lequel on a introduit deux ou trois centièmes de bichromate de potasse, on obtient une masse cristallisée, dont l'étude présente le plus grand intérêt.

Si la calcination a été opérée dans un creuset recouvert d'un autre qui sert en quelque sorte de condensateur,

on trouve dans les creusets deux sortes de cristaux : les uns, qui semblent s'être volatilisés, sont de longs prismes incolores qui ont souvent plusieurs centimètres de longueur et qui présentent l'aspect des fleurs argentines d'antimoine ; les autres sont des cristaux de rubis remarquables par la régularité de leurs formes et leur belle coloration rose. Les longs cristaux prismatiques et incolores sont formés par un silicate double de baryte et d'alumine, qui présente cette composition :

Silice	34,32
Baryte	35,04
Alumine	30,37

Dans ces essais, ce silicate double est venu souvent cristalliser en prismes clinorhombiques, assez courts, durs et transparents, qui ont la même composition que les longues aiguilles prismatiques et creuses.

Ces longs prismes sont constitués souvent par quatre lames à faces parallèles formant les faces d'un prisme creux ; ces lames sont minces, elles éteignent la lumière sous le microscope, ou plutôt elles laissent persister l'obscurité entre deux nicols, parallèlement à leurs intersections mutuelles ; le plan des axes optiques est parallèle à ces intersections, elles se coupent sous des angles de 60° 42′ et 119° 18′.

Il s'est donc produit, dans cette réaction curieuse, du corindon et un silicate double cristallisé ; ces deux substances cristallines résultent des transformations suivantes :

Dans la calcination du mélange d'alumine et de fluorure de baryum, il s'est formé évidemment du fluorure d'aluminium et de la baryte.

« Le fluorure d'aluminium, une fois produit, a dû agir de deux façons différentes.

« Décomposé par les gaz du foyer, il a formé de l'acide fluorhydrique et du corindon qui a cristallisé sous l'influence des vapeurs.

« Agissant, en outre, sur la silice du creuset, il a donné naissance à du silicate d'alumine qui, en s'unissant à la baryte, produit de beaux cristaux de silicate double d'alumine et de baryte.

« Telle est, selon nous, la théorie de la réaction.

« Qu'il nous soit permis actuellement d'insister ici sur les conditions qui ont déterminé la cristallisation des deux corps, celle du corindon et du silicate double. En jetant les yeux sur les échantillons de ces produits, qui présentent des cristaux si nets, on est frappé de la place qu'ils occupent dans les creusets ; ils semblent s'être volatilisés, et cependant, en les exposant aux températures les plus élevées de nos foyers, on a reconnu qu'ils sont absolument fixes.

« C'est que les fluorures ne sont pas seulement des minéralisateurs puissants, ce sont aussi des composés qui donnent, comme on le disait autrefois, des « ailes » aux corps les plus fixes. Ne se rappelle-t-on pas, en effet, cette formation si remarquable du feldspath orthose produit artificiellement et trouvé dans la partie supérieure d'un fourneau à cuivre de Mansfeld ? L'emploi du fluorure de calcium dans le lit de fusion du fourneau qui a produit ce feldspath permet de croire que le fluor est intervenu, dans ce cas, comme agent de transport.

« C'est ce fait qui s'est présenté évidemment dans ces expériences, comme dans celles qui ont été exécutées si souvent par H. Sainte-Claire Deville ; les agents de transport et de cristallisation du corindon et du silicate double

sont également les composés fluorés qui ont été employés par MM. Frémy et Feil.

« Il était à présumer que cette action du fluorure de baryum sur l'alumine, en présence de la silice, qui forme un silicate double cristallisé, rentrerait dans un phénomène général se rapportant à la décomposition des fluorures par différentes bases. C'est en effet ce que l'on a constaté. »

138. — Verre au phosphate de chaux. — Nous dirons un mot d'un produit qui s'éloigne absolument des différents verres dont nous avons parlé jusqu'ici, mais qui leur est très ressemblant comme aspect et comme propriétés physiques.

Nous voulons parler du verre au phosphate de chaux qui est dû à M. Sidot.

On l'obtient en chauffant progressivement, jusqu'au rouge vif, du phosphate acide de chaux qu'on maintient pendant quelques heures à cette température.

Préparé avec soin, ce verre ressemble au verre ordinaire dont il a à très peu près la densité (2,60 au lieu de 2,50).

Il est très réfringent; son indice de réfraction : 1,523, est très voisin de celui du crown, 1,525.

Ce verre ne résiste pas à l'action des acides bouillants ou de la potasse, mais par contre il est insensible à l'action de l'acide fluorhydrique.

Il est impropre à la fabrication des verres colorés, car, à l'exception des oxydes de cobalt et de chrome ; il n'est pas susceptible de dissoudre les colorants métalliques.

139. — Pâte de verre. — On sait que les anciens tiraient du verre des effets surprenants ; qu'ils parvenaient

à le modeler à froid comme la terre glaise, que certaines de leurs pièces exhalaient une odeur délicieuse qui leur était propre et que certaines autres, malléables comme des pièces de métal, se bossuaient quand on les jetait à terre et pouvaient ensuite être redressées au marteau sans jamais se briser.

Pétrone raconte, à ce sujet, que l'empereur Tibère fit trancher la tête d'un artisan qui possédait le secret de la pâte de verre « dans la crainte que, si le secret venait à être connu, on ne fasse pas plus de cas de l'or que de la boue ».

Suivant plusieurs auteurs, une découverte analogue aurait été faite au XVIIe siècle.

D'après Haudicquer de Blancourt, l'ouvrier qui présenta à Richelieu une pièce en verre malléable aurait, au lieu de la fortune qu'il espérait se faire par ce rare et important travail, trouvé la prison perpétuelle.

Cette pâte de verre vient d'être découverte par un artiste de premier ordre, doublé d'un savant, le statuaire Henry Cros.

Il a composé une pâte de verre, dans laquelle on peut enfoncer impunément des clous, comme dans du plomb, sans l'écailler ni l'altérer d'aucune fissure.

Les premières pièces exposées au Salon de 1891 présentaient certains défauts d'exécution dus aux tâtonnements qui précèdent toute découverte ; mais aujourd'hui l'artiste est maître de son procédé et, grâce au concours de l'État, qui a mis un four et un atelier de la manufacture de Sèvres à sa disposition, il vient de composer une pièce (fontaine murale dont les divers sujets représentent l'histoire de l'eau) dont toutes les parties sont parfaites à tous les points de vue.

CHAPITRE VIII

LES DÉFAUTS DU VERRE. — ÉTUDE THÉORIQUE ET PRATIQUE

140. — Défauts du verre. — Après avoir exposé le mode de fabrication des différentes sortes de verre, après avoir indiqué les applications multiples de ces divers produits vitreux, nous croyons utile de terminer ce travail par l'exposé d'une méthode d'investigation appliquée à la recherche des défauts du verre, persuadés d'ailleurs que bien connaître ces défauts, les bien caractériser, c'est presque connaître le moyen de les éviter.

Les défauts qui se produisent dans le verre au cours de sa fabrication résultent de causes très variées. Aussi comprend-on qu'ils soient de natures assez diverses.

Ces défauts, qui altèrent la qualité du verre en en diminuant la valeur, peuvent par la composition des corps qui les constituent, par leur importance et par leur nombre, causer dans certaines circonstances un trouble grave dans l'économie de toute une fabrication.

Malgré l'expérience que peuvent avoir acquise par une longue pratique les industriels chez lesquels ces accidents viennent à se produire, il leur est souvent difficile de se rendre compte d'une façon exacte de la nature et de la

composition des corps qui constituent ces défauts, et par suite des causes qui les ont engendrés. Ils se trouvent donc dans l'impossibilité d'y apporter rapidement un remède efficace.

Ayant été consultés au sujet d'accidents de ce genre qui s'étaient produits dans la fabrication des verres à vitres, des verres à bouteilles, des verres de gobeleterie, nous avons dû chercher la nature des défauts qui en sont la conséquence. C'est le résultat de ces recherches, les moyens employés, que nous allons faire connaître.

Les défauts qui se produisent dans le verre, au moment où il est fabriqué et mis en œuvre, sont :

1° Les bouillons, les points, les crachats ;

2° Les pierres et les grains ou granulations.

Les premiers proviennent d'un affinage incomplet de la matière vitreuse après sa fusion, ou d'un manque de soins de la part des ouvriers au moment du cueillage ou pendant le moulage (emprisonnement dans la masse, de corps ou poussières organiques). Ils sont faciles à reconnaître ; il suffit en effet le plus souvent d'une inspection attentive à l'œil nu, ou au besoin avec la loupe, pour être fixé sur la nature des défauts.

Les seconds, de composition très variable, tout en se ressemblant beaucoup, peuvent être causés ou par un mélange imparfait des matières premières ou par des agglomérations de parties du mélange vitrifiables ayant échappé à la fusion : ce sont les *infondus*. Ils peuvent provenir aussi de portions des parois du creuset ou du bassin qui se sont détachées pendant la fusion, et pour lesquelles la température et la durée du séjour dans le four n'ont pas été suffisantes pour en opérer la combinaison : ce sont les *grains de pot ou de bassin*.

Des portions de la voûte ou de la couronne du four

peuvent encore, en se combinant avec la partie alcaline et vaporisable du mélange vitrifiable, donner lieu à la formation d'un verre de nature spéciale, plus dur que le verre contenu dans le creuset, qui s'y incorpore sans s'y dissoudre. On donne à ce genre de défauts le nom de *larmes* ou *schlagues*.

Enfin, les grains ou granulations peuvent provenir du verre lui-même et être amenés par sa composition chimique, en même temps que par les conditions de température dans lesquelles il s'est trouvé aux diverses phases de sa fabrication.

Les verres, en effet, à une température inférieure à celle qui est nécessaire pour en opérer la fusion, si cette température est maintenue pendant un temps suffisant, peuvent être soumis à une décomposition qui se manifeste par la formation de composés cristallisés qui en altèrent la pureté, la limpidité et la résistance.

Cette décomposition commence toujours par la formation de cristaux microscopiques, qu'on ne découvre souvent que quand l'objet est terminé.

Dans tous les cas, la ténuité des grains dont il s'agit de déterminer la nature en rend la recherche très délicate: l'analyse chimique est, en effet, impuissante par suite de la difficulté qu'on éprouve à les séparer de la masse vitreuse qui les entoure. Quand ils sont nombreux, ces grains ou cristaux agglomérés les uns avec les autres semblent tellement prédominants dans une masse limitée de verre que l'analyse de cette portion cristalline paraît devoir en donner au moins approximativement la composition; mais généralement la matière vitreuse, intimement associée, est tellement abondante que leur composition se trouve masquée par celle du verre qui leur sert de ciment.

Ils sont d'ailleurs trop petits pour être extraits par une opération mécanique, leur poids spécifique est peu différent de celui du verre ambiant, ce qui exclut l'emploi des liqueurs denses telles que l'iodomercurate de potasse ou le tungstoborate de baryum ou de calcium, ou enfin de l'iodure de méthylène dont M. Fouqué, le savant professeur du Collège de France, a imaginé l'emploi et a été le premier à se servir pour l'étude des roches cristallisées.

Ils ne sont pas attirables à l'aimant, et l'acide fluorhydrique les attaque en même temps que le verre lui-même. Bref, tous les moyens usités ordinairement dans l'étude des roches échouent pour la séparation des corps étrangers ou des cristaux incorporés dans les verres, et le seul moyen d'investigation qui puisse être employé dans ce cas est le microscope.

MM. Fouqué et Michel Lévy ont décrit dans leur ouvrage de *Minéralogie micrographique*, justement réputé et dont l'éloge n'est plus à faire, les méthodes et les moyens, basés en grande partie sur l'emploi du microscope, appliqués à l'étude des principaux minéraux et roches éruptives de la France. Ce sont ces procédés que nous avons cherché à utiliser.

L'examen des matières à étudier se fait sur des lames minces d'une épaisseur de trois centièmes de millimètre taillées dans la masse vitreuse qui les englobe ; ces lames minces sont collées au moyen de baume du Canada sur une lame de verre et posées sur le porte-objet du microscope.

Pour déterminer la nature des cristaux, on emploie plusieurs moyens d'investigation venant se compléter les uns les autres.

Grâce à la perfection des appareils dont on dispose, on

peut facilement les examiner à la lumière naturelle, puis à la lumière polarisée entre deux nicols en spath d'Islande croisés, les rayons de lumière étant parallèles.

La détermination des axes optiques est complétée par celle des angles d'extinction des cristaux, en les observant en lumière polarisée et en rayons convergents, successivement, dans des préparations faites en coupe longitudinale et en coupe transversale.

Le corps que l'on rencontre le plus fréquemment est le quartz ; c'est un corps cristallisé dont la détermination se fait facilement ; on constate très aisément qu'on a affaire à un minéral à un axe positif et, en outre, la biréfringence peut être mesurée avec facilité.

Il se rencontre dans les parties infondues et provient, comme on l'a dit plus haut, d'un mélange imparfait des matières vitrifiables, ou d'une sorte de liquidation produite au moment de la fusion du verre, dans un vaisseau chauffé à trop basse température.

Quand il provient de la séparation d'un fragment, du bassin ou de la voûte, il se trouve enrobé dans une matière amorphe, grisâtre, diffusant fortement la lumière, et se distinguant surtout au microscope, en lumière réfléchie ; cette matière n'est autre qu'un silicate d'alumine déshydraté, non dissous dans la masse vitreuse.

Il peut se faire, comme nous le verrons plus loin, que, si l'argile vient à se dissoudre, il se forme un feldspath cristallisé, analogue à celui qu'on trouve dans la nature.

La présence du quartz dans ces deux cas, donne beaucoup de ressemblance à ces défauts et c'est à la présence simultanée de la matière amorphe grisâtre, provenant de l'argile, et au développement du feldspath qu'il est possible d'en déterminer la cause.

Toutefois, la silice libre à l'état de quartz n'est pas un

accompagnement obligé de l'argile ; on rencontre quelquefois des pierres, qui ne contiennent que du silicate d'alumine déshydraté, sur l'origine duquel il n'y a aucun doute à avoir.

Ce cas se rencontre surtout dans les défauts sous forme de grains que l'on trouve dans le cristal, ou le demi-cristal, le quartz devant être exclu des terres servant à faire les creusets dans lesquels on les fond. (Ceux-ci se perceraient rapidement, en effet, par suite de l'attaque qu'en ferait l'oxyde de plomb, qui entre dans leur composition.)

La présence du quartz, à l'état de grains non dissous dans le verre, amène infailliblement la fêlure d'abord et la rupture ultérieure de la pièce dans laquelle il est incorporé.

Quand il est allié à de l'argile, ou quand l'argile est seule, la rupture de la pièce est moins certaine, le coefficient de dilatation de l'argile étant sensiblement le même que celui du verre.

Ce dernier défaut est celui qu'on rencontre le plus fréquemment dans les fours à bassin, employés presque exclusivement pour la fabrication des verres à vitres et des bouteilles ; il provient de l'attaque des parois, à la hauteur de la flottaison.

Si ce sont des corps cristallisés, auxquels on a affaire, leur composition chimique dépend essentiellement de celle du verre lui-même.

Quand le verre est uniquement sodique et calcique, c'est de la *wollastonite* qui se produit. Quand le verre est magnésien et ferrugineux, c'est un piroxène magnésien de la formule du diopside qui se forme.

Si le verre contient de l'alumine, en même temps que de la potasse, de l'oxyde de fer et de la magnésie, c'est de

la mélilite, à la variété artificielle de laquelle on donne le nom de *humboldtilite*.

Enfin, dans certains cas particuliers plus rares, on voit se développer des cristaux de feldspath, de la variété comme sous le nom d'*oligoclase* et de *labrador*.

Dans tous les cas, surtout en même temps que la humboldtilite, on voit se produire un minéral réfringent et très biréfringent, en longues aiguilles prismatiques, très étroites, dont la détermination minéralogique n'a pu encore être faite rigoureusement. Parmi les minéraux précipités, la wollastonite est celui que l'on rencontre le plus communément dans les verres. C'est un bisilicate de chaux (CaO, SiO^2) appartenant à la famille des piroxènes; elle cristallise dans le système monoclinique, les cristaux sont allongés parallèlement à l'orthodiagonale. Dans les verres, elle forme de longues aiguilles prismatiques très étroites, qui ont quelquefois plusieurs centimètres de longueur, mais dont la largeur dépasse rarement 0,005 millimètres et l'épaisseur 0,001 millimètre; elle est incolore et transparente. Cependant elle se distingue déjà, en lumière naturelle, au microscope, à cause de sa réfringence voisine de 1,63 et très légèrement supérieure à celle du verre ambiant.

Quand on l'observe en lumière polarisée parallèle entre les nicols croisés, on constate les faits suivants :

Les sections longitudinales polarisent dans des teintes qui varient du bleu grisâtre au jaune pâle, toutes s'éteignent rigoureusement en long; le signe d'allongement n'est pas constant, la plupart de ces sections présentent un allongement de signe positif ; les autres, qui sont en général les moins brillantes, ont un allongement de signe négatif.

Les sections transversales sont courbes et très étroites, tout en demeurant encore légèrement allongées.

Entre les nicols croisés, elles se colorent de teintes vives, d'un rose violacé ; elles s'éteignent obliquement, sous des angles dont nous donnerons ci-après la valeur.

Ces propriétés suffisent pour montrer que, comme la wollastonite naturelle, les cristaux en question appartiennent au système monoclinique et que le plan des axes optiques est perpendiculaire à la direction d'allongement.

Les observations en lumière convergente confirment ces données de l'observation en lumière parallèle : on s'assure, en effet, que le plan des axes optiques est parallèle aux sections transversales, que la bissectrice aiguë est assez rapprochée de la normale aux sections longitudinales, dont l'allongement est le signe positif ; dans les deux cas on observe, d'ailleurs, des images symétriques par rapport à la direction d'allongement ; on constate, en même temps, que la bissectrice est négative, et que l'écartement des axes est d'environ 40°.

Un essai chimique confirme encore la détermination des cristaux en question, comme wallastonite.

En effet, si, après avoir découvert une préparation et l'avoir nettoyée à la benzine, on la laisse séjourner vingt-quatre heures à froid dans l'acide chlorhydrique, on s'assure aisément que les cristaux sont attaqués, tandis que le verre ambiant est inaltéré.

La préparation lavée à l'eau distillée donne un liquide où l'oxalate d'ammoniaque décèle la présence de la chaux; et la préparation elle-même, traitée par une goutte de solution de violet d'aniline, se teint dans tous les points où l'attaque a mis en liberté de la silice gélatineuse.

La wollastonite développée dans le verre par un phé-

nomène de dévitrification offre une grande tendance à se disposer sous forme radiée; il arrive même que la wollastonite forme dans le verre des sphérolithes dont le volume peut atteindre la grosseur du poing.

La wollastonite se montre, dans certaines dévitrifications, accompagnée d'un pyroxène jaune verdâtre qui, vu en lame mince, est à peine nuancé d'une légère teinte jaune. Il possède toutes les propriétés du diopside des roches naturelles, sauf que les faces dominantes semblent être les faces du prisme.

De même que la wollastonite et le diopside, la humboldtilite présente fréquemment de très beaux exemples d'inclusions vitreuses à bulle.

Nous rattacherons à la famille des feldspaths certains cristaux dont nous avons trouvé des spécimens dans des petites plages arrondies provenant de dévitrifications. Les sections observées du minéral en question ont environ $0^{mm},08$ de longueur et $0^{mm},05$ de largeur; leur forme est rectangulaire ; leur allongement est de signe négatif; c'est un minéral à deux axes écartés; le plan des axes optiques est parallèle à la direction d'allongement. La réfringence et la biréfringence sont celles des feldspaths acides. Les extinctions se font dans un angle très petit (environ $2°$ à $3°$). On observe une mâcle binaire ressemblant beaucoup à la mâcle de Karlsbad. Quand on dispose la section de manière à ce que la direction d'allongement fasse un angle notable avec les sections des nicols croisés, on aperçoit des bandes étroites discontinues ressemblant à celles de certains feldspaths tricliniques naturels et en particulier à celles de l'anorthose; mais il est difficile, à cause de la petitesse de l'angle d'extinction, de dire si l'on a affaire à un minéral mâclé suivant la loi de l'albite ou à un prisme cannelé. Les essais chi-

miques étaient impraticables sur les échantillons que nous avons eu à examiner. C'est donc avec un certain doute que nous rapportons ces cristaux à un minéral de la famille des feldspaths, bien que toutes les propriétés observées s'accordent avec celles de ces minéraux.

Comme dans les éléments de dévitrification ci-dessus étudiés, ces derniers produits cristallisés renferment de belles inclusions vitreuses à bulle qui affectent généralement la forme de leur hôte.

De l'étude dont nous venons de donner le résultat, on peut déduire quelques conséquences utiles au point de vue de la composition des verres et des qualités qu'il est possible de leur donner suivant les usages auxquels ils sont destinés.

Il en ressort, en effet, que le phénomène de la dévitrification du verre, sur lequel les opinions ont été longtemps partagées, s'explique naturellement par la formation, dans la masse vitreuse colloïde, de silicates cristallisés, simples ou multiples, de composition différente du verre qui leur a donné naissance, et que, de plus, ces silicates, dont la présence est une cause de dépréciation du verre dont ils altèrent la limpidité et la résistance en en augmentant la fragilité, et dont il faut par suite chercher à éviter la formation, se produisent à des températures différentes pour chacun d'eux suivant leur composition chimique, cette température étant, en tout cas, inférieure à celle à laquelle la fusion du mélange et la combinaison des éléments vitrifiables se sont opérées.

La chaux étant la base terreuse la plus employée par suite de son abondance dans la nature, du bon marché auquel elle peut être obtenue à l'état de pureté et des qualités qu'elle donne au verre quand elle est en combinaison avec la potasse ou la soude, il est naturel de

chercher à en augmenter la proportion le plus possible; on est arrêté dans cette voie par le phénomène de la dévitrification et la formation de wollastonite qui se produisent d'autant plus facilement que la proportion de chaux est plus grande, à une température relativement élevée, très voisine de celle requise pour le travail du verre en objets façonnés.

La magnésie est dans le même cas, et son addition à la chaux préexistante ne fait qu'accentuer ce phénomène en donnant lieu à la formation de diopside d'une part, et de wollastonite d'autre part.

Cette observation est conforme à celle de E. Péligot, qui avait été amené, par l'analyse de cristaux provenant des dévitrifications de verre de Blanzy et par l'étude cristallographique faite par M. Des Cloiseaux, à penser que la magnésie même jouait un rôle prépondérant dans ce phénomène. Il n'en est pas de même de l'alumine, qui en venant s'ajouter aux bases précédentes, est susceptible de donner ou des feldspaths ou des cristaux de la famille des mélilites dont la formation est beaucoup plus difficile.

Même en opérant aux températures convenables, les expériences de MM. Fouqué et Michel Lévy constatent que la cristallisation du feldspath ne se fait qu'avec une grande lenteur, et, quant à la mélilite, sa formation implique à la fois la présence dans le verre de la potasse, de l'alumine, de la magnésie et du fer en proportion notable, conditions qui se trouvent bien plus souvent réalisées dans les matières vitreuses des hauts fourneaux que dans les produits des verreries.

La première raison est, à notre avis, celle de la grande stabilité des verres alumineux qui peuvent être travaillés indéfiniment sans donner de cristallisation, quoique la

somme des bases terreuses soit souvent supérieure à la quantité de chaux qui, dans un verre unique, serait suffisante pour amener rapidement la dévitrification.

La présence dans un verre de certaines bases, alumine et potasse, a pour résultat de diminuer la faculté qu'a ce verre de se dévitrifier, puisque les silicates d'alumine et de potasse sont relativement peu fusibles et surtout difficilement cristallisables ; il semble que les verriers devraient s'attacher à produire les verres réalisant ces conditions d'autant plus qu'il en résulterait pour eux une économie notable d'argent, l'alumine étant un produit d'une valeur infiniment moindre que les alcalis proprement dits, potasse et soude.

En tout cas, l'introduction de l'alumine présente des avantages comme moyen d'empêcher la dévitrification, car les feldspaths et les mélilites, silicates alumineux, sont moins fusibles que les minéraux du groupe des pyroxènes, silicate non alumineux. Il serait très facile aux verriers de se procurer à bas prix des calcaires argileux d'une composition telle qu'il leur suffirait d'ajouter du sable et un peu de base alcaline pour obtenir des verres stables.

Certains verriers ont pu, par l'emploi de feldspaths naturels de composition convenable, introduire en même temps que l'alumine les bases alcalines, potasse et soude, indispensables, réalisant ainsi les meilleures conditions de résistance et d'économie.

Si, dans les fabrications du verre à bouteilles pour lesquelles les qualités recherchées et exigées sont la solidité et l'inaltérabilité sous l'action des liquides acidulés, on peut employer des matières impures donnant une composition à bases multiples de proportions non constantes, il n'en est plus de même dans la fabrication des verres

qui, outre ces qualités primordiales, doivent posséder d'autres qualités, entre autres celle d'être parfaitement incolores. C'est le cas des verres pour la lunetterie et l'optique.

L'examen que nous venons de faire des produits de la dévitrification du verre et du verre à bouteilles nous conduit à quelques considérations théoriques relativement à leur constitution.

Deux théories ont été proposées pour ces phénomènes; quelques chimistes, et à leur tête Berzélius, ont émis l'opinion que le verre dévitrifié n'était autre chose que la matière vitreuse ayant acquis des propriétés nouvelles par la cristallisation ; cette opinion, partagée encore aujourd'hui par un grand nombre de verriers, a été soutenue par Pelouze dans un travail sur la *cristallisation du verre*, lu en 1874 à l'Académie des sciences.

« La dévitrification, dit ce savant, consiste en un simple changement physique du verre. »

Il se base pour adopter cette conclusion sur ce fait que de nombreuses analyses ne lui ont montré qu'une différence insignifiante de composition entre le verre primitif et la même matière après dévitrification.

Il admet implicitement qu'un verre quelconque est susceptible de se transformer entièrement en une matière cristallisée.

D'après lui, le fait se passerait notamment pour le silicate de soude et de chaux qui constitue les verres tels qu'on les compose ordinairement et dans lesquels la silice, la soude et la chaux n'entrent pas en proportions définies.

Cette explication, en contradiction avec les lois connues de la chimie, n'est évidemment justifiée que dans des cas particuliers ; ce sont ceux dans lesquels le verre présente

la composition d'un minéral défini ou bien encore d'un mélange de minéraux définis susceptibles de cristalliser.

On connaît de nombreux exemples de faits de ce genre. Ainsi les expériences de MM. Fouqué et Michel Lévy ont montré que l'on pouvait faire cristalliser intégralement les verres ayant la composition de l'oligoclase, du labrador, de l'anorthite, de la néphéline, des pyroxènes, etc.

D'autres expériences plus complexes des mêmes auteurs ont permis d'obtenir à l'état cristallisé des mélanges de plusieurs silicates qu'ils avaient préalablement fondus en un verre limpide et parfaitement homogène; nous citerons comme exemple la reproduction du basalte composé de feldspath, de labrador, d'olivite, d'augite et de fer oxydulé ; nous citerons aussi la reproduction de certaines néphélinites composées de népheline, d'augite, de spinelle, de grenats mélanite et de fer oxydulé. Dans ces derniers cas, la cristallisation du verre formé avec le mélange chimique employé était complète, mais on comprend très bien que, dans un grand nombre de cas, on puisse imaginer des mélanges qui ne soient pas susceptibles de se résoudre en un agrégat de substances cristallisées.

Une seconde théorie, plus rationnelle, a été proposée en 1830 par M. J.-B. Dumas ; ce savant a considéré la dévitrification comme une cristallisation du verre due à la formation de composés définis infusibles à la température existante au moment de la dévitrification et impliquant, dans la plupart des cas, la formation d'un résidu amorphe correspondant à un mélange chimique dont les éléments, soit isolés, soit combinés, ne sont pas connus à l'état cristallisé.

Il admet que cette infusibilité relative est le résultat tantôt de la volatilisation alcaline, tantôt d'un simple

partage dans les éléments du verre ; les alcalis passent alors, d'après lui, dans la portion qui concerne l'état vitreux.

Pour M. Dumas, les éléments cristallisés ne préexistent pas dans le verre et ne se forment qu'au moment de la dévitrification. Pour d'autres auteurs, le verre, malgré son homogénéité apparente, contient déjà dans sa masse des composés définis qui s'en séparent au moment de la cristallisation.

D'après cette opinion, le verre dévitrifié aurait une constitution identique à celle qu'il présente à l'état fondu ; ce serait une sorte de dissolution des éléments cristallisables faite à une haute température dans une matière dissolvante avec conservation de la molécule cristalline au sein du dissolvant.

M. Beurath, savant industriel à Dorpat, a discuté la question de savoir quel était le dissolvant en question et lui a attribué les compositions suivantes :

$$NaO.\ CaO.\ 6SiO^2.$$
$$NaO.\ CaO.\ 4SiO^2.$$

Mais nous ferons remarquer que, même en admettant l'assimilation du verre aux dissolutions, il serait impossible d'attribuer aux deux silicates précités le rôle que l'on a voulu leur donner ; en effet, dans les cas de cristallisation complète qui ont été cités précédemment, l'agent dissolvant n'a pu présenter cette composition surtout d'une façon constante ; il a dû présenter des compositions incessamment variées pendant la durée de la cristallisation et, en dernier lieu, être identique au minéral qui a cristallisé postérieurement à tous les autres.

Il faut donc écarter l'idée d'un dissolvant unique et

commun à tous les verres, en un mot d'un verre normal. Un second point très intéressant de la question est celui de savoir dans l'hypothèse précédente, si ce sont véritablement les minéraux cristallisés par l'effet de la dévitrification qui sont en dissolution dans le verre.

La comparaison avec les dissolutions aqueuses, tout à fait légitime dans le cas qui nous occupe, ne paraît pas justifier cette manière de voir. On sait, en effet, par des expériences variées, qu'en général les sels en dissolution n'ont pas la composition de ceux que l'on obtient par une cristallisation de la matière dissoute.

Les expériences faites au moyen de la dialyse, l'étude des refroidissements produits par la dissolution des sels, enfin l'examen des substances solubles douées de la polarisation rotatoire, justifient parfaitement cette conclusion.

Les études des pétrographes contredisent aussi l'opinion que les éléments définis compris dans une sorte de dissolution au sein d'un verre homogène sont identiques à ceux que révèle une cristallisation par dévitrification.

Comme exemple, nous citerons ce fait qu'un verre ferrugineux agit très peu sur l'aiguille aimantée, tandis que, si l'on soumet ce verre à un recuit qui amène sa dévitrification, on y fait naître aisément des cristaux microscopiques de fer oxydulé, et alors la matière est devenue fortement magnétique.

On peut donc dire que le fer oxydulé ne préexistait pas, mais qu'il a pris naissance par la dévitrification.

Ainsi, tout en admettant que le verre est un mélange de corps à composition définie, dont les molécules plus ou moins complexes offrent des groupements déterminés propres à chacune d'elles, nous pensons que les molécules en question sont différentes, dans la plupart des

cas, de celles qui entreront ensuite dans la constitution des cristaux du verre dévitrifié.

Les phénomènes que présente le sucre de canne, suivant qu'il est cristallisé ou fondu, c'est-à-dire à l'état de verre, ou dissous, vont nous permettre de faire ressortir avec plus de netteté l'interprétation que nous venons d'exprimer au sujet de la composition intime du verre.

Le sucre cristallisé est dépourvu de polarisation rotatoire ; il possède, au contraire, cette propriété, soit quand il est à l'état de sucre d'orge, soit quand il est dissous ; ce fait montre déjà la similitude des verres et des dissolutions; il montre, en outre, que le réseau moléculaire qui appartient aux cristaux est détruit dans les cas de dévitrification ou de dissolution.

Dans ces deux cas, la molécule élémentaire du sucre reste seule en évidence et sa désignation se trahit par les phénomènes de polarisation rotatoire auxquels il donne naissance. Cet exemple est très frappant, en ce sens qu'il montre bien la différence qui existe entre un verre et une matière cristalline de même composition.

Le verre renferme des molécules complexes ayant une composition et une symétrie propres, mais ces molécules n'offrent aucun groupement régulier, ne forment pas de réunion jusqu'au moment où commence le phénomène de dévitrification. Il nous reste à considérer la question des relations existant entre la composition chimique du verre et celle des cristaux qu'il est susceptible de produire.

J.-B. Dumas, comme nous l'avons vu ci-dessus, avait emis l'idée que les cristaux provenant d'une dévitrification étaient toujours plus acides que le résidu vitreux de cette opération; dans certains cas particuliers, l'opinion de Dumas est justifiée par l'observation.

Des exemples nombreux de dévitrification observés,

soit dans des roches naturelles, soit dans des laitiers de hauts fourneaux, montrent effectivement que, dans certains cas, assez nombreux même, il y a production de silice cristallisée sous forme de tridymite.

Les expériences de reproductions artificielles effectuées à haute température par M. Hautefeuille lui ont permis d'obtenir, au sortir d'un bain alcalin, non seulement la tridymite, mais encore du quartz cristallisé.

M. Fouqué a obtenu de la silice cristallisée sous forme de tridymite associée à un pyroxène calcique en dévitrifiant un verre formé de 63 0/0 de silice et 37 0/0 de chaux.

Nous avons tout dernièrement observé une formation abondante de lamelles de tridymite dans les fissures de grains de quartz enclavés dans un verre.

Les grains de quartz en question avaient 1/2 millimètre à 1 millimètre de diamètre ; ils avaient en grande partie perdu leur action sur la lumière polarisée ; ils se montraient parsemés de nombreuses inclusions, les unes vitreuses, les autres gazeuses.

Ces grains étaient séparés en plusieurs fragments par des fentes irrégulières, larges de quelques centièmes de millimètre et remplies par de la matière vitreuse.

Dans ces interstices, la tridymite se montre sur la tranche ; elle agit sur la lumière polarisée et ressemble beaucoup par sa biréfringence et son signe d'allongement à de l'albite ou de l'oligoclase.

Dans ce cas, la tridymite n'est pas le résultat d'une simple dévitrification ; elle provient de la réaction mutuelle qu'ont exercée l'un sur l'autre le quartz et une matière vitreuse fondue.

La présence du quartz demeuré solide au milieu de la matière en fusion a déterminé la cristallisation de la tri-

dymite aux dépens du verre très siliceux logé dans les fentes du minéral.

Cette influence est d'ailleurs manifestée par la disposition de la tridymite en touffes normales à la surface des fragments quartzeux. C'est un fait analogue à celui qui s'accomplit dans les cristallisations en grand qui s'opèrent parfois dans les verreries.

On sait en effet que si, dans du verre fondu de composition convenable, on projette des fragments de verre à l'état solide, ces fragments servent de points de départ et de centre à une cristallisation.

L'analogie des verres avec les dissolutions devait d'ailleurs faire prévoir ce phénomène. En somme, la mise en liberté de la silice ne s'obtient artificiellement aux dépens d'un verre que dans certains cas particuliers ; la dévitrification des verres ordinaires se fait le plus souvent suivant un mode inverse ; les produits principaux qui se séparent à l'état cristallisé sont plus basiques que la partie qui reste à l'état vitreux quand la cristallisation est opérée.

En effet, ces trois produits sont :

La wollastonite ;

La diopside ;

La mélilite,

Qui ne contiennent guère que 50 0/0 de silice, tandis que le verre en général en renferme 70 à 74 0/0 ; le résidu est donc encore plus acide, et, si souvent les analystes sont arrivés à des conclusions contraires, c'est que les cristaux prenaient naissance au sein d'un liquide complexe englobant nécessairement une partie décomposée encore liquide, en sorte que leur analyse ne peut pas ordinairement donner la composition des silicates qui se sont séparés par cristallisation. Du reste, le microscope

montre les proportions considérables de verre qui subsistent au milieu des concrétions de dévitrification en apparence les mieux cristallisées.

En résumé, nous nous représentons le verre comme formé d'un ou plusieurs composés définis dont les molécules sont dépourvues d'arrangement régulier et par suite différant entièrement des assemblages en réseaux propres aux substances cristallisées.

D'après les considérations ci-dessus exposées, les composés définis entrant dans la composition des verres seraient constitués par des molécules déjà bien individualisées au point de vue physique et composées par des agrégats atomiques définis au double point de vue de la composition chimique et de l'arrangement.

Ces composés peuvent être, dans certains cas, identiques aux corps cristallisés susceptibles de prendre naissance au sein du verre ; mais, dans d'autres cas, ils peuvent offrir une construction différente favorable seulement à la formation de certains corps cristallisés.

La tendance à la cristallisation est d'autant plus marquée que la composition du verre se rapproche davantage de celle d'une espèce ou d'un mélange de plusieurs espèces cristallines connues.

FIN

TABLE DES MATIÈRES

INTRODUCTION

Pages.

§ 1. — **Origine du verre. — Historique** 1
§ 2. — **Définition. — Propriétés fondamentales** 8
§ 3. — **Classification. — Compositions** 9

CHAPITRE PREMIER

ACTION DES AGENTS PHYSIQUES ET CHIMIQUES

§ 1. — **Agents physiques** 17

1. — Action de la lumière 17
2. — » de la chaleur. — Fusibilité 25
3. — Dévitrification 26
4. — Dilatation. — Retrait. — Recuisson 29
4 *bis*. — Trempe du verre. — Larmes bataviques. — Applications. — Procédés de trempe. — Application du verre trempé à la fabrication des traverses de chemins de fer. . 32
5. — Résistance à la pression, à la flexion. . . . 43
6. — Porosité du verre. 46

§ 2. — **Agents chimiques** 48

7. — Action de certains gaz réducteurs 48
8. — » de l'air. — Irisation. 50
9. — » de l'eau. 51
10. — » des solutions salines 54
11. — » des acides 55
12. — Gravure sur verre. 56
13. — Verre givré. 58
14. — Verre craquelé. 59

Pages.

§ 3. — **Analyse du verre** 59

15. — Méthode Sainte-Claire Deville 59
16. — Méthode industrielle 63
17. — Analyse des verres plombeux 66

CHAPITRE II

PRODUITS RÉFRACTAIRES, FOURS DE VERRERIE ET COMBUSTIBLES

§ 1. — **Poterie. — Produits réfractaires** 69

18. — Produits réfractaires 69
19. — Analyse chimique des argiles 71
20. — Analyse mécanique des argiles (dosage du sable libre) 72
21. — Essai pyrométrique des argiles et produits réfractaires 75
22. — Fabrication des matériaux réfractaires 77
23. — Creusets de verrerie 79
24. — Matériaux pour la construction des fours . . . 87

§ 2. — **Fours de verrerie** 88

25. — Four Boétius 89
26. — Four Quennec 90
27. — Four Siemens 92
28. — » » à radiation 99
29. — Fours à courants opposés 104
30. — Cloches à gaz 108
31. — Des diverses formes de régénérateurs 111
32. — Four rond à colonne centrale 116
33. — » » à brûleur central 117
34. — Four appliqué au principe de la régénération du carbone 119

§ 3. — **Gazogènes** 138

35. — Des diverses formes données aux gazogènes . 138
36. — Grilles de gazogènes à barreaux immergés (système Perret) 139
37. — Gazogènes Liégel-Lührmann, Taylor 140
38. — Gazogènes soufflés : Wilson, Marteau, Lencauchez 146

§ 4. — **Combustibles** 150

39. — Gaz à l'eau 150
40. — Gaz naturel 155
41. — Combustible employé dans les gazogènes . . 161

Pages.
42. — Appareil à mélanger les combustibles. . . . 162
43. — Analyse et essai des combustibles. 163
44. — » des gaz combustibles 167
45. — » des produits de la combustion . . . 171
46. — Détermination de la chaleur entraînée par les gaz brûlés 181
47. — Détermination de la température des fours. . 184
48. — Pyromètres, pyroscopes. 186

CHAPITRE III

VERRES ORDINAIRES

§ 1. — Verre soluble 197

49. — Fabrication. 197
50. — Caractères et applications. 202

§ 2. — Verre à bouteilles 212

51. — Historique 212
52. — Compositions vitrifiables 213
53. — Fabrication. 216
54. — Soufflage à l'air comprimé. 232

§ 3. — Gobeleterie 234

55. — Verre blanc, verre demi-blanc 234
56. — Compositions vitrifiables 235
57. — Fabrication. 236

§ 4. — Verre à vitres. 239

58. — Historique 239
59. — Compositions vitrifriables. 243
60. — Fabrication 246
61. — Fours à étendre 249

VERRE EN PLATEAUX

62. — Historique 256
63. — Fabrication 257
64. — Fabrication des cives 260
65. — Irisation, retirage. 263
66. — Verre perforé 264
67. — Verre de montres. 265

CHAPITRE IV

GLACES ET PRODUITS SPÉCIAUX

Pages.

§ 1. — **Glaces** 269

68. — Historique 269
69. — Matières premières, leur mélange. 270
70. — Fonte, affinage. 273
71. — Coulage 277
72. — Découpe. 279
73. — Doucissage 281
74. — Savonnage 283
75. — Polissage 284
76. — Résistance comparée du verre brut et du verre poli 286
77. — Etamage. 287
78. — Argenture 288
79. — Platinage 293
80. — Dorure 295
81. — Examen des glaces : détermination de l'épaisseur, de la planimétrie et du parallélisme des faces. 295
82. — Glaces soufflées 309

§ 2. — **Verre mince coulé** 310

83. — Fabrication. 311
84. — Résistance du verre à reliefs. 313

§ 3. — **Verre moulé** 314

85. — Boîtes et tuyaux en verre. 314
86. — Cuves à vin. 323
87. — Maison en verre. 324
88. — Rideaux en verre. 326
89. — Tables, guéridons, dessous de plats, etc., en verre 327
90. — Verre grillagé. 327

CHAPITRE V

VERRE DE BOHÊME, CRISTAL, VERRE D'OPTIQUE PHARES

§ 1. — **Verre de Bohême**. 335

91. — Historique et fabrication. 335

Pages.

§ 2. — Cristal. 339

92. — Historique 339
93. — Fours de cristallerie. 340
94. — Compositions vitrifiables 344
95. — Diverses compositions du cristal. 345
96. — Travail et taille 348

§ 3. — Verre d'optique 352

97. — Historique 352
98. — Compositions vitrifiables. 353
99. — Fabrication 356
100. — Qualités que doit posséder le verre d'optique. 357
101. — Travail des pièces. 358
102. — Pouvoir optique des objectifs. 360
103. — Verres de lorgnettes. 362
104. — Tableaux des indices de réfraction. 363

§ 4. — Phares. 364

105. — Historique 364
106. — Composition du verre pour phares. 367
107. — Exécution des pièces. 368
108. — Projecteurs électriques. 370
109. — Situation actuelle des phares en France. . . 371

CHAPITRE VI

STRASS, ÉMAIL, VERRES COLORÉS, MOSAÏQUE, VITRAUX

§ 1. — Strass. 373

110. — Fabrication et composition 373

§ 2. — Émail. 375

111. — Composition d'émaux non colorés. 376
112. — Émaux incrustés. 380
113. — » translucides. 382
114. — » peints. 382
115. — Émaillage des objets usuels 383
116. — Émaillage du verre. 384

§ 3. — Verres et cristaux colorés 385

117. — Verres bleus 386
118. — » verts 387
119. — » violets. 388
120. — » jaunes. 389

Pages.
121. — Verres rouges. 392
122. — » rouges à l'or. 393
123. — » roses au sélénium. 398
124. — » noirs 398
125. — » doublés 399
126. — » marbrés 400
127. — Aventurines. 402
128. — Verre filigrané. 404
129. — Millefiori. 411
130. — Perles. 411
131. — Verres murrhins. 414
132. — Mosaïque. 415
133. — Coton et laine de verre. 417
134. — Yeux artificiels. 419

§ 4. — **Vitraux** 421

135. — Vitraux peints. 423
136. — Exécution d'un vitrail 424

CHAPITRE VII

VERRES DURS, VERRES MALLÉABLES

137. — Verres durs à base d'alumine. 427
138. — Verres au phosphate de chaux 433
139. — Pâte de verre 433

CHAPITRE VIII

LES DÉFAUTS DU VERRE
ÉTUDE THÉORIQUE ET PRATIQUE

140. — Défauts du verre 435

Tours. — Imprimerie Deslis Frères.